

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N0715A270017  
Konstruování strojů a technických zařízení  
Specializace: Konstruování výrobních strojů a zařízení

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Konstrukční návrh stroje pro zkoušky hlubokého tažení

Autor: **Bc. Daniel Marušík**  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Václav Kubec, Ph.D.**

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Daniel MARUŠTÍK**  
Osobní číslo: **S20N0007K**  
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**  
Specializace: **Konstruování výrobních strojů a zařízení**  
Téma práce: **Konstrukční návrh stroje pro zkoušky hlubokého tažení**  
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

## Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Cílem práce je navrhnout zkušební stroj pro zkoušky hlubokého tažení. Parametry stroje budou vycházet z požadavků technických norem a další požadované zkoušky. Konstrukční návrh bude zahrnovat možnost výměny nástrojů a také výběr pohonu. Základní nosné části přípravku budou pevnostně zkontrolovány pomocí numerických simulací pro maximální zatížení.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova práce:

1. Analýza zadání, rešerše
2. Specifikace požadavků
3. Návrh variant řešení
4. Konstrukční návrh vybrané varianty
5. Zpracování výkresové dokumentace

Konzultant: Ing. Danuše Jánská, COMTES FHT a.s.

Rozsah diplomové práce: **40-60 stran A4**  
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Příručka strojního inženýra: obecné strojní části*. Praha: Computer Press, 1999. ISBN 80-7226-055-3  
[2] RUDOLF, B. *Tvářecí stroje: základy výpočtů a konstrukce: vysokoškolská učebnice*. 2., opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.  
Podkladové materiály, výkresy, prospekty, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Václav Kubec, Ph.D.**  
Katedra konstruování strojů

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2021**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2022**

L.S.

---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan

---

**Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 16. října 2021.

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Bc. Marušík	Jméno Daniel
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	N0715A270017 „Konstruování strojů a technických zařízení“	
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení Doc. Ing. Kubec, Ph.D.	Jméno Václav
<b>PRACOVISTĚ</b>	ZČU - FST - KKS	
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del>BAKALÁŘSKÁ</del>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Konstrukční návrh stroje pro zkoušky hlubokého tažení	

<b>FAKULTA</b>	Strojní	<b>KATEDRA</b>	KKS	<b>ROK ODEVZD.</b>	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	94	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	71	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	23
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS</b>	<p>Cílem diplomové práce je navrhnout stroj pro hluboké tažení a provádění zkoušek hlubokotažnosti plechů. Dvojčinný lis s přidržovačem je konstruován na maximální sílu 1,5 MN (z toho 0,7 MN připadá na přidržovač). Lis má umožnit přestrojení na hydraulickou zkoušku, jejíž návrh je taktéž součástí této práce. Dalším cílem je návrh siloměru a jeho uložení pro měření síly na tažném nástroji. Výsledný konstrukční návrh je v závěru podroben MKP analýze pro kontrolu napěťově-deformačních stavů.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	<p>hluboké tažení, hydraulický lis, tažník, tažnice, přidržovač, plech, zkoušky hlubokotažnosti, křivka mezní tvařitelnosti, diagram mezní tvařitelnosti</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Bc. Marušík	Name Daniel
<b>FIELD OF STUDY</b>	N0715A270017 „Design engineering of machines and technical devices“	
<b>SUPERVISOR</b>	Surname Doc. Ing. Kubec, Ph.D.	Name Václav
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKS	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Design of machine for deep drawing tests	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2022
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	94	<b>TEXT PART</b>	71	<b>GRAPHICAL PART</b>	23
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>	<p>The aim of the diploma thesis is to design a machine for deep drawing and testing of sheet metals. A double-acting hydraulic press with a blank holder is designed for a maximum force of 1,5 MN (of which 0,7 MN falls on the holder). The press should enable conversion to hydraulic (bulge) test. A design of the bulge test is also included. Another goal is to design a force transducer and its mounting for measuring output force. The final design is subjected to FEM analysis to check its stress-strain behavior.</p>
<b>KEY WORDS</b>	<p>deep drawing, hydraulic press, punch, drawing die, blank holder, sheet metal, deep drawing tests, forming limit curve, forming limit diagram</p>

## Obsah

1	Úvod .....	11
2	Rešerše.....	12
2.1.	Historie zpracování kovů.....	12
2.2.	Technologie zpracování kovů.....	13
2.2.1	Tváření.....	13
2.2.2	Odlévání .....	13
2.2.3	Obrábění .....	14
2.2.4	Svařování.....	14
2.2.5	Prášková metalurgie .....	15
2.3.	Tváření kovů.....	15
2.3.1	Plošné tváření .....	15
2.3.2	Objemové tváření .....	16
2.4.	Tažení plechů .....	18
2.4.1	Tažení se ztenčením stěny .....	18
2.4.2	Tažení bez ztenčení stěny.....	18
2.4.3	Napětí a deformace při tažení.....	19
2.4.4	Stroje .....	20
2.4.5	Vady výtažků.....	21
2.4.6	Mazání .....	21
2.5.	Zkoušky hlubokého tažení.....	22
2.5.1	Zkouška dle Nakajimy.....	23
2.5.2	Zkouška hloubením podle Erichsena.....	24
2.5.3	Zkouška kalíškovací.....	25
2.5.4	Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa .....	26
2.5.5	Zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukuiho zkouška).....	26
2.5.6	Zkouška hydraulická (Tomlenova).....	27
2.5.7	Příprava vzorků .....	28
2.5.8	Měření systémem ARAMIS .....	29
3	Požadavky na stroj.....	30
4	Návrh variant.....	32
4.1.	Základní koncepce stroje.....	32
4.2.	Varianty .....	33
4.2.1	Rám .....	33

4.2.2	Kinematika nástrojů.....	35
5	Analytické výpočty.....	38
5.1.	Návrh a kontrola rámu.....	38
5.1.1	Návrh horní traverzy.....	38
5.1.2	Návrh sloupů.....	39
5.1.3	Rozměry rámu.....	40
5.1.4	Kontrola rámu.....	41
5.2.	Návrh hlavního pohonu.....	44
5.2.1	Návrh plunžru hlavního pohonu.....	44
5.2.2	Výpočet stěny pracovního válce.....	44
5.2.3	Kontrola navržené stěny válce.....	45
5.3.	Návrh sestavy pro bulge test.....	46
5.3.1	Kontrola plunžru.....	47
5.3.2	Kontrola stěny válce.....	47
5.4.	Návrh siloměru.....	48
5.4.1	Kontrola napětí v oblasti krčku.....	48
5.4.2	Kontrola poměrné deformace v místě krčku.....	49
6	Konstrukční návrh stroje.....	50
6.1.	Obecný popis stroje.....	50
6.2.	Horní traverza.....	52
6.3.	Střední traverza a přídržovač.....	53
6.4.	Dolní traverza.....	55
6.5.	Sloupy a jejich ukotvení.....	56
6.5.1	Výpočet utahovacího momentu šroubů sloupových matic.....	57
6.6.	Siloměr.....	58
6.7.	Nástroj pro zkoušku dle Nakajimy.....	59
6.8.	Nástroj pro hydraulickou zkoušku bulge.....	60
6.9.	Nástroj pro zkoušku s viskózním trnem.....	61
7	MKP analýza.....	62
7.1.	Analýza siloměru.....	62
7.1.1	Tvorba sítě.....	62
7.1.2	Okrajové podmínky.....	62
7.1.3	Výsledky.....	62
7.2.	Analýza stroje.....	64
7.2.1	Optimalizace modelu.....	64
7.2.2	Tvorba sítě.....	64



7.2.3	Okrajové podmínky .....	66
7.2.4	Výsledky.....	67
8	Závěr.....	70

## Seznam příloh

- Příloha 1: Katalog vodících tyčí firmy HYDRAULICS s.r.o.
- Příloha 2: Sloupové matice NORD-LOCK SUPERBOLT MT
- Příloha 3: Kluzné pouzdro SKF PBM 12014080 M1G1
- Příloha 4: Siloměry GTM DR
- Příloha 5: Plynová pružina KALLER TX 20000-150
- Příloha 6: Výkres sestavy lisu

## Seznam použitých zkratek

CAD	Computer Aided Design (Počítačem podporované navrhování)
CAE	Computer Aided Engineering (Počítačem podporované inženýrství)
CAM	Computer Aided Machining (Počítačem podporované obrábění)
MKP	Metoda Konečných Prvků
ČSN	České technické normy
ISO	International Organization for Standardization (Mezinárodní org. pro normalizaci)
EN	European Standards (Evropské normy)
SLS	Selective Laser Sintering (Selektivní laserové spékání)
FLC	Forming Limit Curve (Křivka mezní tvařitelnosti)
FLD	Forming Limit Diagram (Diagram mezní tvařitelnosti)
HMH	Huber, Von Mises, Hencky (Hypotéza max. hustoty deform. energie na změnu tvaru)

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Název	Jednotka
$T_t$	Teplota tavení	[°C]
$\sigma_{k_{tr}}$	Mez kluzu horní traverzy	[MPa]
$E_{tr}$	Youngův modul pružnosti horní traverzy	[GPa]
$k_{tr}$	Bezpečnostní koeficient horní traverzy	[-]
$\sigma_{D_{tr}}$	Dovolené namáhání horní traverzy	[MPa]
$F$	Celková síla lisu	[MN]
$F_t$	Síla tažníku	[kN]
$F_p$	Síla přidržovače	[kN]
$R_e$	Mez kluzu	[MPa]
$F_{tr}$	Síla působící na horní traverzu	[MN]
$R_A, R_B$	Reakce v podporách	[MN]
$l_{tr}$	Délka horní traverzy	[mm]
$b_{tr}$	Šířka horní traverzy	[mm]
$h_{tr}$	Výška horní traverzy	[mm]
$S_{tr}$	Obsah průřezu horní traverzy	[mm <sup>2</sup> ]
$W_{o_{tr}}$	Průřezový modul v ohybu horní traverzy	[mm <sup>3</sup> ]
$J_{o_{tr}}$	Kvadratický moment průřezu horní traverzy	[mm <sup>4</sup> ]
$M_{o_{tr_{max}}}$	Maximální ohybový moment horní traverzy	[Nm]
$\sigma_{o_{tr}}$	Ohybové napětí horní traverzy	[MPa]
$\tau_{s_{tr}}$	Smykové napětí horní traverzy	[MPa]
$\sigma_{red_{tr_{HMH}}}$	Redukované napětí horní traverzy dle HMH	[MPa]
$\sigma_{k_{sl}}$	Mez kluzu sloupu	[MPa]
$E_{sl}$	Youngův modul pružnosti sloupu	[GPa]
$k_{sl}$	Bezpečnostní koeficient sloupu	[-]
$\sigma_{D_{sl}}$	Dovolené namáhání sloupu	[MPa]
$F_{sl}$	Síla působící na sloup	[MPa]
$l_{sl}$	Délka sloupu	[mm]
$d_{sl}$	Průměr sloupu	[mm]
$S_{sl}$	Obsah průřezu sloupu	[mm <sup>2</sup> ]
$W_{o_{sl}}$	Průřezový modul v ohybu sloupu	[mm <sup>3</sup> ]
$J_{o_{sl}}$	Kvadratický moment průřezu sloupu	[mm <sup>4</sup> ]
$\sigma_{t_{sl}}$	Tahové napětí ve sloupu	[MPa]
$\sigma_{o_{sl}}$	Ohybové napětí ve sloupu	[MPa]
$\sigma_{max_{sl}}$	Maximální napětí ve sloupu	[MPa]
$\varphi_{tr}$	Úhel pootočení traverzy	[°]
$\varphi_{sl}$	Úhel pootočení sloupu	[°]
$M_o$	Ohybový moment	[Nm]
$d_{1_v}$	Vnitřní průměr válce hlavního pohonu	[mm]
$d_{2_v}$	Vnější průměr válce hlavního pohonu	[mm]

Symbol	Název	Jednotka
$d_{3_v}$	Vnější průměr plunžru hlavního pohonu	[mm]
$h_v$	Zdvih hlavního pohonu	[mm]
$p_v$	Tlak ve válci hlavního pohonu	[MPa]
$F_{skut_v}$	Skutečná síla hlavního pohonu	[MPa]
$\sigma_{k_v}$	Mez kluzu válce hlavního pohonu	[MPa]
$k_v$	Bezpečnostní koeficient válce hl. pohonu	[-]
$\sigma_{D_v}$	Dovolené namáhání válce hl. pohonu	[MPa]
$k_{v\_HMH}$	Koeficient tloušťky stěny válce hl. pohonu	[MPa]
$\sigma_{r_v}(r_1)$	Radiální napětí ve stěně válce hl. pohonu	[MPa]
$\sigma_{t_v}(r_1)$	Tečné napětí ve stěně válce hl. pohonu	[MPa]
$\sigma_{o_v}$	Obvodové napětí ve stěně válce hl. pohonu	[MPa]
$\sigma_{red_v}(HMH)$	Redukované napětí ve válci hl. pohonu	[MPa]
$d_{1_B}$	Průměr plunžru pro bulge test	[mm]
$d_{2_B}$	Vnitřní průměr stěny válce pro bulge test	[mm]
$d_{3_B}$	Vnější průměr stěny válce pro bulge test	[mm]
$l_{1_B}$	Zdvih plunžru pro bulge test	[mm]
$F_B$	Síla vyvozená plunžrem pro bulge test	[kN]
$p_B$	Pracovní tlak ve válci pro bulge test	[MPa]
$\sigma_{k_p_B}$	Mez kluzu plunžru pro bulge test	[MPa]
$k_{p_B}$	Bezpečnostní koeficient plunžru pro bulge test	[-]
$\sigma_{D_p_B}$	Dovolené namáhání plunžru pro bulge test	[MPa]
$\sigma_{k_v_B}$	Mez kluzu hydraulického válce pro bulge test	[MPa]
$k_{v_B}$	Bezpečnostní koeficient válce pro bulge test	[-]
$\sigma_{D_v_B}$	Dovolené namáhání válce pro bulge test	[MPa]
$\sigma_{r_B}(r_1)$	Radiální napětí ve stěně válce pro bulge test	[MPa]
$\sigma_{t_B}(r_1)$	Tečné napětí ve stěně válce pro bulge test	[MPa]
$\sigma_{o_B}$	Obvodové napětí ve stěně válce pro bulge test	[MPa]
$\sigma_{red_B}(HMH)$	Redukované napětí ve válci pro bulge test	[MPa]
$p_p$	Tlak v plynové pružině	[MPa]
$F_{p_1}$	Síla jedné plynové pružiny	[kN]
$h_p$	Zdvih plynové pružiny	[mm]
$n_{sl}$	Počet sloupů lisu	[-]
$p_m$	Míra předepnutí sloupové matice	[-]
$n_{\text{šr}}$	Počet šroubů jackbolt sloupové matice	[-]
$d_{2_j}$	Střední průměr šroubů jackbolt	[mm]
$P$	Stoupání závitu šroubů jackbolt	[mm]
$f$	Koeficient tření v závitu	[-]
$F_{ps}$	Předepínací síla na sloup lisu	[MN]
$F_{p\text{š}}$	Předepínací síla na jeden šroub jackbolt	[kN]
$\alpha_z$	Úhel stoupání šroubovice	[°]

Symbol	Název	Jednotka
$\varphi_z$	Třecí úhel závitu	[°]
$M_{\xi}$	Utahovací moment šroubů jackbolt	[Nm]
$\sigma_{k_s}$	Mez kluzu siloměru	[MPa]
$k_s$	Bezpečnostní koeficient siloměru	[-]
$\sigma_{D_s}$	Dovolené namáhání siloměru	[MPa]
$E_s$	Youngův modul pružnosti siloměru	[GPa]
$\sigma_{t_s}$	Tahové namáhání siloměru v krčku	[MPa]
$d_{1_s}$	Vnitřní průměr krčku siloměru	[mm]
$d_{2_s}$	Vnější průměr krčku siloměru	[mm]
$l_k$	Délka přímé části krčku siloměru	[mm]
$\Delta l_k$	Prodloužení přímé části krčku siloměru	[mm]
$S_k$	Obsah průřezu siloměru v oblasti krčku	[mm <sup>2</sup> ]
$R$	Nominální odpor tenzometru	[Ω]
$\Delta R$	Změna odporu tenzometru	[Ω]
$\varepsilon_k$	Poměrné prodloužení siloměru v místě krčku	[-]
$\varepsilon_{k_{min}}$	Minimální poměrné prodloužení krčku siloměru	[-]
$\varepsilon_{k_{max}}$	Maximální poměrné prodloužení krčku siloměru	[-]
$S_{sl_{př}}$	Obsah průřezu sloupu v místě předepnutí	[mm <sup>2</sup> ]
$\Delta l_{sl_{př_H}}$	Prodloužení sloupu v předepnuté části horní traverzy	[mm]
$l_{0_{sl_{př_H}}}$	Délka předepnutí sloupu v horní traverze	[mm]
$\Delta l_{sl_{př_D}}$	Prodloužení sloupu v předepnuté části dolní traverzy	[mm]
$l_{0_{sl_{př_D}}}$	Délka předepnutí sloupu v dolní traverze	[mm]

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Nástroje z doby železné [11].....	12
Obrázek 2: Mechanismus vyrobený technologií SLS [9].....	14
Obrázek 3: Výtažek vyrobený tažením se ztenčením stěny [10].....	18
Obrázek 4: Technologie tažení bez ztenčení stěny (vlevo) a se ztenčením stěny (vpravo) [2] ....	18
Obrázek 5: Namáhání a deformace výtažku [2] .....	19
Obrázek 6: Vady výtažků [3].....	21
Obrázek 7: FLC křivka (FLD diagram) [5] .....	22
Obrázek 8: Zkouška dle Nakajimy [5].....	23
Obrázek 9: Tvary vzorků pro zkoušku dle Nakajimy [5] .....	23
Obrázek 10: Zkouška hloubením dle Erichsena [4].....	24
Obrázek 11: Zkouška kalíškovací [4] .....	25
Obrázek 12: Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa [4] .....	26
Obrázek 13: Fukuiho zkouška [4].....	26
Obrázek 14: Hydraulická (Tomlenova) zkouška [4] .....	27
Obrázek 15: Schéma bulge testu [4] .....	27
Obrázek 16: Pravidelná čtvercová síť na porušeném vzorku [13].....	28
Obrázek 17: Náhodný (stochastický) nástřik vzorku před a po zkoušce [14] .....	28
Obrázek 18: Soustava kamer a osvětlení systému ARAMIS [1].....	29
Obrázek 19: Poloha snímacího zařízení [7].....	29
Obrázek 20: Deformovaný vzorek v systému ARAMIS [15] .....	29
Obrázek 21: Maximální hloubka výtažku a průměr přístřihu.....	30
Obrázek 22: Graf průběhu sil na zkušebním vzorku .....	31
Obrázek 23: Struktura navrhovaného systému .....	32
Obrázek 24: Graf hodnocení variant.....	34
Obrázek 25: Kinematika nástrojů - pevná tažnice .....	35
Obrázek 26: Varianta A .....	35
Obrázek 27: Varianta B .....	35
Obrázek 28: Kinematika nástrojů - pevný tažník .....	36
Obrázek 29: Varianta C .....	36
Obrázek 30: Varianta D .....	36
Obrázek 31: Kinematika nástrojů - pevný přídržovač .....	37
Obrázek 32: Varianta E .....	37
Obrázek 33: Varianta F.....	37
Obrázek 34: Výpočtový model horní traverzy .....	38
Obrázek 35: Okno rámu.....	40
Obrázek 36: Deformace rámu.....	41
Obrázek 37: Výpočtový model rámu lisu .....	41
Obrázek 38: Průběh ohybového momentu kolem rámu .....	42
Obrázek 39: Schéma hydraulického pohonu .....	44
Obrázek 40: Průběhy napětí ve stěně válce .....	45
Obrázek 41: Návrh nástroje pro bulge test .....	46
Obrázek 42: Návrh siloměru.....	48
Obrázek 43: Popis hlavních částí stroje.....	50
Obrázek 44: Základní rozměry stroje .....	51
Obrázek 45: Horní traverza .....	52
Obrázek 46: Sestava horní traverzy .....	52

Obrázek 47: Středová traverza.....	53
Obrázek 48: Valivé ložisko Dr. TRETTER.....	53
Obrázek 49: Kluzné ložisko SKF .....	53
Obrázek 50: Vedení traverzy po sloupu .....	54
Obrázek 51: Sestava středové traverzy s přídržovačem .....	54
Obrázek 52: Svařenec dolní traverzy.....	55
Obrázek 53: Postup svařování dolní traverzy .....	55
Obrázek 54: Předepínací matice SUPERBOLT .....	56
Obrázek 55: Ukotvení sloupů .....	56
Obrázek 56: Model siloměru .....	58
Obrázek 57: Hlavní rozměry siloměru.....	58
Obrázek 58: Sestava pro zkoušku dle Nakajimy .....	59
Obrázek 59: Sestava pro hydraulickou zkoušku bulge .....	60
Obrázek 60: Sestava pro viskózní bulge test .....	61
Obrázek 61: Síť a okrajové podmínky siloměru.....	62
Obrázek 62: Napěťová analýza siloměru (von Mises) .....	62
Obrázek 63: Výsledná deformace - siloměr .....	63
Obrázek 64: Poměrná deformace ve směru Z - siloměr .....	63
Obrázek 65: Optimalizovaný model .....	64
Obrázek 66: Zahuštění sítě svaru dolní traverzy .....	64
Obrázek 67: Zahuštění sítě v kritickém místě horní traverzy .....	64
Obrázek 68: Detail sítě v oblasti horní traverzy .....	65
Obrázek 69: Detail sítě v oblasti dolní traverzy .....	65
Obrázek 70: Okrajové podmínky simulace lisu (vpravo řez plynovou pružinou).....	66
Obrázek 71: Napěťová analýza hydraulického lisu .....	67
Obrázek 72: Napěťová analýza horní traverzy .....	68
Obrázek 73: Průběh napětí ve sloupu v místech předepnutí.....	68
Obrázek 74: Napěťová analýza dolní traverzy .....	69
Obrázek 75: Napětí v hlavním pohonu .....	69

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Morfologická matice řešení rámu stroje .....	33
Tabulka 2: Varianty provedení rámu lisu .....	33
Tabulka 3: Kriteriaální hodnocení variant.....	33
Tabulka 4: Přepočtené hodnoty variant dle významu kritérií .....	34
Tabulka 5: Konečné pořadí variant.....	34
Tabulka 6: Parametry horní traverzy.....	40
Tabulka 7: Parametry sloupu.....	40
Tabulka 8: Rozměry bulge.....	46
Tabulka 9: Parametry siloměru.....	48
Tabulka 10: Parametry valivého ložiska.....	53
Tabulka 11: Parametry kluzného ložiska.....	53
Tabulka 12: Porovnání komerčních siloměrů s navrženým.....	58



## 1 Úvod

Říká se, že investice do výzkumu a vývoje je investicí do budoucnosti. V oblasti strojírenství to pak musí platit dvojnásob. V dnešní dynamicky se vyvíjející době vzrůstají nároky na technické a ekologické aspekty konstrukčních celků či jiných výrobků. To vše při maximální hospodárnosti a s ohledem na zpřísňující se bezpečnostní požadavky chránící uživatele či spotřebitele. Vyhovět všem požadavkům na výbornou prakticky není reálné. Počítačová podpora a CAD/CAE/CAM systémy hrají stále větší roli v projekční, konstrukční i výrobní fázi navrhovaného produktu. Při dodržení potřebných norem je pak možno dosahovat stále lepších výsledků i díky optimalizačním technikám, které počítačový software nabízí.

Tuhost konstrukcí se dá primárně ovlivnit dvěma způsoby. Zaprvé jejich geometricko-topologickými vlastnostmi a zadruhé volbou vhodného materiálu. Na první v pořadí je dnes možno aplikovat moderní počítačové metody umožňující například generativní navrhování, topologickou analýzu nebo konvergentní modelování. Vedle toho však také rostou nároky na samotný konstrukční materiál. Mechanické vlastnosti kovových, ale i jiných materiálů, jsou výsledkem výrobního procesu i následného zpracování. Pro zjištění nebo ověření těchto vlastností existuje široká řada normalizovaných zkoušek, které mohou být statické či dynamické (rázové nebo únavové). Podrobná znalost kvalit daného materiálu nám umožňuje jeho efektivní a hospodárné využití ve všemožných aplikacích od těžkého průmyslu, přes dopravní techniku, až po uplatnění v oblasti medicíny.

Cílem diplomové práce je vytvoření konstrukčního návrhu stroje pro zkoušky hlubokého tažení. Rozmanitost těchto zkoušek a jejich realizovatelnost je podmíněna komplexností daného zařízení. Proto je kladen důraz na maximalizaci využitelnosti stroje určeného pro experimentální účely. Z principu je navrhován hydraulický lis vertikální konstrukce s přidržovačem a zařízením pro měření pracovní síly. Jednou z předností tohoto stroje má být jeho rychlé a snadné přestrojení na hydrostatickou zkoušku, takzvaný bulge test.

Zadavatelem je firma **COMTES FHT a.s.** sídlící v Dobřanech. Podnik s konstrukčním, technologickým a především výzkumným záberem disponuje celou škálou strojů pro mechanické zkoušky materiálů. Vedle normalizovaných zkoušek zde provádí specifické testování a měření definované zákazníkem. Přítomnost metalografického oddělení pak umožňuje analýzu materiálu na mikroskopické úrovni. Tímto způsobem je možno sledovat např. strukturní podobu a funkční vlastnosti oceli po chemicko-tepelném zpracování či svařování. Určování velikosti zrna nebo zjišťování přítomnosti mikrotrhlin přitom může hrát zcela zásadní roli při výběru konstrukčního materiálu.

V **COMTESU** plánují rozšířit své portfolio o univerzální stroj pro zkoušky hlubokotažnosti. Současný trh však nenabízí příliš variant, které by uspokojily náročnějšího zákazníka. Smyslem této práce je tedy navrhnout stroj na míru vyhovující potřebám dobřanského podniku, který lze vyrobit v „domácích“ podmínkách.

Práce začíná rešerší z oblasti plošného tváření plechů, jejich mechanického zkoušení a progresivních vyhodnocovacích metod. Následuje variantní návrh konstrukčního řešení a výběr nejvhodnější koncepce. Ta je pak detailně zpracována a v závěru podrobena **MKP** analýze, která dokládá způsobilost navrženého lisu z v momentě plného zatížení. Důraz je pochopitelně kladen na splnění parametrů a nároků vznesených zadavatelem.

## 2 Rešerše

### 2.1. Historie zpracování kovů

Historie zpracování kovů sahá do několika tisíciletí před naším letopočtem. Jedná se totiž o jedno z vůbec nejstarších řemesel, které se člověk naučil ovládat. Přesné datování sice není známo, ale odhady vzniku prvních měděných výrobků sahají do *9. tisíciletí př. Kr.* Tehdy pravěcí lidé začali poznávat, těžit a následně zpracovávat první kovové materiály. Těmi byly zprvu měď, později zlato a následně také stříbro, cín, olovo a rtuť. V zásadě šlo o materiály, které byly snadno dostupné, tzn. naležitelné v čisté formě nebo je šlo mechanicky odloučit z příslušné kovové rudy. Časem se lidé naučili jednotlivé kovy extrahovat z rud nebo meteoritů jejich zahřátím na potřebnou teplotu. V té době se z těchto kovů vyráběly především šperky, ozdoby a nenáročné nástroje, protože samotná měď postrádala další užité vlastnosti.

Objev a rozšíření bronzu (zhruba *4. tisíciletí př. n. l.*) bylo zcela zásadní pro další civilizační rozvoj, protože najednou bylo možno vyrábět trvanlivé nástroje, zbraně a stavební materiál, který byl mnohem odolnější a nepodléhal rychlé degradaci. V té době už byly známé technologie kování i lití, které umožňovaly relativně snadnou produkci výrobků z bronzu. Doba bronzová přetrvávala dle regionu zhruba do *12. století př. Kr.*

V tu dobu postupně docházelo k dalšímu historickému přelomu lidské civilizace. Nejvyhledávanějším kovem se stalo železo. Jeho odlučování z železných rud (s využitím dřevěného uhlí) bylo známo už dlouho, ale bylo zřejmě považováno za podřadný materiál. Železné zbraně a nástroje totiž nebyly tak odolné a tvrdé jako jejich bronzové protějšky. Železná produkce se stala významnou až v době, kdy se lidé naučili vyrábět ocel. Zahřívání železa a uhlíku dalo za vznik mnohem tvrdší a pevnější struktury – oceli. Slitina železa a uhlíku byla sice poprvé objevena kolem roku *2 000 př. n. l.*, ale ve skutečnosti trvalo dlouhá staletí, než se našel způsob, jak ocel vyrábět v potřebném množství a kvalitě. [11] [12]



Obrázek 1: Nástroje z doby železné [11]

## 2.2. Technologie zpracování kovů

Dnes již existuje řada výrobních technologií pro zpracování železných i neželezných kovů. Liší se dosahovanými vlastnostmi a každá si najde své uplatnění v konkrétní aplikaci. Tyto technologie mají zcela zásadní vliv na mechanické nebo vizuální vlastnosti koncového výrobku.

### 2.2.1 Tváření

Tvářením se rozumí výroba součásti změnou tvaru polotovaru působením vnějších sil. Síly musí v materiálu vyvolat dostatečné velké napětí překračující mez kluzu. Zároveň ale nesmí dojít k porušení soudržnosti materiálu, takže síla je limitována jeho mezí pevnosti. Dochází k přeskupování krystalických zrn a současně platí zákon zachování objemu. Tento děj doprovází fyzikální a strukturální změny materiálu, které mají za následek změnu jeho mechanických vlastností. Právě možnost zásahu do mikrostruktury je hlavní výhodou této metody zpracování. Dalšími výhodami je vysoká produktivita a velmi slušné využití materiálu (minimum odpadu). Nevýhodou jsou však vysoké ceny strojů a nástrojů, bez kterých se produktivní výroba neobejde. Podle teploty tváření rozlišujeme tváření za tepla a za studena.

#### 2.2.1.1 Tváření za tepla

Při tváření za tepla je polotovar zahřát nad rekrystalizační teplotu (teplota rekrystalizace je přibližně 0,35 teploty tavení materiálu a polotovar je obvykle zahříván zhruba na  $0,7 T_t$ ). To je teplota, při které dochází k regeneraci deformovaných zrn za současného obnovování mechanických vlastností kovu, ke kterému dochází bezprostředně. K tváření stačí díky poklesu přetvárného odporu o hodně menší síly než při tváření za studena. Nejsou tedy kladeny tak vysoké nároky na únosnost stroje. Povrch však není tak kvalitní a vlivem vysokých teplot bývá do jisté míry okujený.

#### 2.2.1.2 Tváření za studena

Tvářením za studena se zjemňuje zrno a vzrůstá pevnost kovu. Zrna se deformují ve směru tváření a obvykle vzniká viditelná textura na povrchu součásti. Současně klesá houževnatost a tažnost. Protože se zrna deformují ve stejném směru, dochází ke vzniku anizotropie mechanických vlastností. Při studeném tváření se dosahuje velmi kvalitního povrchu a rozměrové přesnosti výrobku, ale za cenu vysokých tvářecích sil, na které musí být stroje a nástroje uzpůsobeny.

#### 2.2.1.3 Tváření za poloohřevu

Tváření za poloohřevu tvoří kompromis mezi výše uvedenými. Materiál je zahřátý pod rekrystalizační teplotu, takže stále dochází k jeho deformačnímu zpevnění. Cílem je ale snížení přetvárného odporu polotovaru (u nízkouhlíkových ocelí se při  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  zvýší tažnost o 20 až 30 %).

### 2.2.2 Odlévání

Odlévání je společně s tvářením nejstarší metodou zpracovávání kovů. Dutý prostor formy je vyplňován roztaveným kovem nebo slitinou kovů a po následném vychladnutí je odlitek dodatečně opracován do požadovaného tvaru. Odléváním je reálně dosáhnout relativně kvalitního povrchu a tvaru, který vyžaduje minimální finální úpravy. Je možno odlévat složité tvary včetně dutin, kterých není možno dosáhnout jiným technologickým postupem (svařování, obrábění apod.) nebo by to bylo přinejmenším velmi neekonomické. Nevýhodou mohou být vyšší náklady na výrobu modelů, respektive forem. Při sériové výrobě je však odlévání hospodárnější než např. obrábění, protože se dosahuje mnohem vyššího využití materiálu.

### 2.2.3 Obrábění

Obrábění je proces, při kterém dochází k úběru materiálu na obrobku a vytváří se nové povrchy určitého tvaru, rozměrů a kvality. Metody mohou být velmi produktivní a díky dokončovacím metodám (honování, lapování, superfinišování) je dosahováno velmi kvalitního povrchu součástí. Obrábění je výhodné pro kusovou i sériovou výrobu, protože mimo upínací přípravky nejsou potřeba žádné speciální formy nebo nástroje. Moderní CNC stroje dovedou obhospodařit širokou škálu obráběcích operací a úkonů, takže je často možno dosáhnout výsledku i na jediné upnutí. Vedle konvenčních třískových metod existují také nekonvenční metody obrábění jako: elektroerozivní, elektrochemické, obrábění laserem, elektronovým nebo vodním paprskem a další.

### 2.2.4 Svařování

V tomto případě se jedná o nerozebíratelné spojování stejnorodých materiálů za působení tepla, tlaku nebo kombinací obou. V místě svarového spoje se materiál obou dílů natavuje a dochází tak ke vzniku tavné lázně, ve které se materiál promísí. Teoretická pevnost svarového spoje je stejná jako pevnost základního materiálu. Toho lze však prakticky jen velmi těžko dosáhnout, a proto se při výpočtech svařovaných konstrukcí musí počítat s vyšší bezpečností. Při svařování dochází vlivem lokálního vnášení tepla k modifikaci struktury materiálu. V daném místě hrubne zrna. Teplem ovlivněná zóna, která je i po vychladnutí viditelná, se vyznačuje rozdílnými fyzikálními i mechanickými vlastnostmi. Vlivem smršťování chladnoucího kovu v něm totiž vzniká pnutí, kterého je možno se následně zbavit ziháním pro snížení pnutí. Výhodou svařovaných konstrukcí je poměrně snadná a rychlá realizovatelnost. Současně se jedná o hospodárnou technologii, protože lze ušetřit materiál a řešení bývá levnější než v případě výkovek nebo odlitků. Nevýhodou je, že ne každý materiál je svařitelný. V případě oceli se svařitelnost posuzuje dle uhlíkového ekvivalentu, který je přepočtem nežádoucích příměsí právě na procentuální obsah uhlíku v materiálu.

Dále lze do této kategorie zařadit aditivní technologii *SLS* (*Selective Laser Sintering*), která spočívá v nanášení kovového prášku v tenké vrstvě na podložku a následně se v požadovaných místech prášek spéká pomocí laseru. Poté se tisková podložka posune níže a nanáší se další vrstva prášku. Dají se takto vyrobit tvarově velmi složité a přesné díly, které jiným způsobem vyrobit nelze. Na dalším obrázku je pro zajímavost ukázka pohyblivého mechanismu tištěného metodou *SLS*. Při tisku nespečený prášek zůstává postupným nanášením v okolí tištěného dílu a je s ním v přímém kontaktu. Toho se využívá při tištění tvarově složitých dílů nebo pohyblivých mechanismů, kdy volný prášek tvoří oporu pro své okolí a zároveň odděluje jednotlivé díly mechanismu. Po skončení samotného tisku se musí celý díl důkladně očistit. Metoda je pro svou nízkou produktivitu vhodná pouze pro maloobjemovou výrobu.



Obrázek 2: Mechanismus vyrobený technologií SLS [9]

### 2.2.5 Prášková metalurgie

Prášková metalurgie se zabývá výrobou kovových prášků, jejich lisováním a slinováním. Ačkoliv je tato technologie známá už od starověku, začala se ve větším rozsahu používat až na přelomu 19. a 20. století. Tehdy se takto začaly průmyslově zpracovávat kovy s vysokou teplotou tavení (wolfram, molybden), pro které tehdy neexistovalo vhodné tavící zařízení. Podobně lze dnes vyrábět materiály, které lze kvůli jejich teplotní odolnosti získat pouze slinováním – cermety, slinuté karbidy. Vynález žárovky Thomasem Edisonem (1879) výrazně přispěl k rozvoji práškové metalurgie wolframu na výrobu vláken. Tato technologie má řadu jedinečných užití. Dají se takto získat výrobky se speciálními vlastnostmi jako např. žárupevnost, žáruvzdornost, ořevzdornost nebo poréznost (samomazná ložisková pouzdra). Slinováním se dají spojovat i látky, které nelze sloučit ve formě báze-legující prvek. [6]

## 2.3. Tváření kovů

Podle převládajícího směru deformace a stavu napjatosti uvnitř materiálu rozlišujeme dva druhy tváření - plošné a objemové. Níže jsou uvedena jejich specifika a konkrétní výrobní technologie.

### 2.3.1 Plošné tváření

Při plošném tváření převládá deformace ve dvou směrech a změna tloušťky nebo průřezu se zanedbává. Zároveň v polotovaru dochází ke vzniku rovinného stavu napjatosti. Typicky se provádí za studena, ale v náročnějších případech, kdy je pro danou technologii zvláště výhodné snížit přetvárný odpor materiálu, se polotovar předehřívá.

#### 2.3.1.1 Tažení plechů

Technologií tažení plechů a pásů vzniká prostorový, polo-uzavřený a nerozvinutelný tvar z připraveného přístříhu. Dosahuje se toho v jednom nebo několika po sobě jdoucích krocích. Nástrojem je tažidlo skládající se z tažníku a tažnice a velmi často i přidržovače. Plech je tlačěn tažníkem do matrice přes tažnou hranu, která je tak značně namáhána. Přidržovač pak tlačí rondel proti desce tažnice a tím zabraňuje nadměrný vtok materiálu do jejího otvoru ve středu. Tím se zamezuje vlnění plechu na jeho okrajích. Potřebná síla je odvozena od tvářeného materiálu (mez kluzu, koeficient tření) a rozměrech výtazku. Je třeba počítat i s materiálovým zpevněním. V zásadě se dá tažení dělit na tažení se ztenčením stěny a bez ztenčení stěny (budou popsány v následující kapitole). Dále podle výšky výlisku na tažení mělké a hluboké nebo podle tvaru na tažení rotačně symetrických nádob, hranatých (nerotačních) nádob nebo nepravidelných tvarů (karosářské výtazky).

#### 2.3.1.2 Stříhání

Stříhání je velmi rozšířenou a zároveň jedinou tvářecí operací, při které dochází k řízenému porušení materiálu ve střížné rovině. V principu je materiál tlačěn nástrojem (střížníkem) do otvoru střížnice a působením protilehlých střížných hran dojde postupně k plastické deformaci a konečnému ustřížení polotovaru. Ve střížné rovině vzniká smykové napětí, které nakonec přesáhne mez pevnosti stříhaného materiálu a ten se usmýkne dříve, než nástroj projede plnou tloušťkou výstřížku. V důsledku toho nejsou střížné plochy zcela rovinné, ale nerovnoměrně zdrsňené (místa prvního výskytu trhlin bývají drsnější).

#### 2.3.1.3 Ohýbání

Ohýbání plechů, trubek, drátů a tyčí se obecně provádí v ohýbadle, který je tvořen nástroji ohybníkem a ohybnicí. Polotovar je trvale deformován do daného úhlu ohybu s určitým ohybovým

rádiem. Výsledkem ohýbání je vždy zpětně rozvinutelný tvar. Po odeznění vnějšího zatížení se vlivem elastické deformace ohybek částečně vrátí do původního stavu (tzv. odpružení). To má u technologie ohýbání zvláštní význam, který je tím znatelnější, čím jsou delší ramena ohýbaného dílu.

Při ohýbání je vnější strana dílu zatížena tahem a vnitřní strana tlakem. V průřezu tedy tahové napětí plynule přechází v napětí tlakové a někde uvnitř je oblast nulového napětí a nulové deformace. Spojnice těchto míst se nazývá neutrální osa a ta se v průběhu deformace postupně posouvá k vnitřnímu povrchu ohybku. Mezi technologie ohýbání patří kromě prostého ohýbání také ohraňování, rovnání, zakružování, obrubování, lemování apod.

#### 2.3.1.4 Rovnání

Rovnání sice můžeme řadit do ohýbacích technologií, ale jak už z názvu vyplývá, jde v podstatě o reverzní proces. Snahou je deformovaný díl narovnat zpět do roviny. Existuje řada způsobů ručního i strojního rovnání plechů, drátů, trubek nebo tyčového materiálu. V případě ručního rovnání se klasicky využívá úderů zámečnického kladiva nebo měděné palice do rovaného plechu opřené o kovadlinu nebo rovnací desku. Dráty se pak táhnou skrz průvlak nebo přes převislý (zajištěný) váleček. U strojního rovnání, které je přesnější a produktivnější, se pak využívá rovanacích stolic (technologie rovnání metodou střídavého ohýbání) nebo lisů, které stlačují materiál mezi čelistmi, které mohou být dle lisovacích podmínek buďto rovinné nebo bodové či bradavkové (pro tvrdý nebo příliš tenký materiál).

### 2.3.2 Objemové tváření

K deformaci i vzniku napjatosti dochází ve směru všech tří os souřadného systému. Vzhledem k náročnosti tvářecích operací se zde více uplatňuje předehřev a tváří se za tepla. Pravidlem je vyšší poměr objemu k plošné výměře tvářeného kusu oproti rovinnému tváření.

#### 2.3.2.1 Válcování

Válcování je rozšířená technologie objemového tváření, která může probíhat za tepla (válcování předvalků), poloohřevu i za studena (vývalky - dokončovací, přesné válcování). Uskutečňuje se na válcovacích stolicích a spočívá v kontinuálním průchodu materiálu mezi pracovními válci. Výška polotovaru se snižuje za současného rozšiřování do stran. Podle orientace provalku k osám válců rozlišujeme válcování podélné, příčné a kosé (válcování bezešvých trubek). Válce mohou být hladké (válcování plechů), rýhované (válcování předvalků) nebo kalibrované (válcování profilů). Válcování se provádí buď pro dosažení požadovaných rozměrů provalku nebo z důvodu zlepšení mechanických vlastností nebo zvýšení přesnosti výstupních rozměrů. Výslednými produkty válcování jsou pak různé profily, plechy, nosníky a kolejnice, tyče a dráty, bezešvé trubky, obruče a další.

#### 2.3.2.2 Kování

Obvykle se provádí za tepla (kovací teploty oceli 800 – 1280 °C), ale dle potřeby i za studena. Provádí se ručně nebo na strojích (lisy, buchary), kde je možné kovat mnohatunové výkovky. Dále se rozlišuje volné a zápusťkové kování. Technologie nabízí řadu výhod. Kromě dobrého využití materiálu také dosažení optimální rozměrové přesnosti a kvality povrchu. Je možno kovat všechny tvárné kovy a jejich slitiny (nejčastěji oceli a neželezné kovy jako měď, hliník, titan a další). Správné prokování je důležité pro odstranění hrubé struktury materiálu např. u ingotů, sochorů apod. Na lisech probíhá spíše statické zatěžování výkovku a často se kove na jediný zdvih, přičemž dochází k prokování v celém průřezu. Buchary na druhou stranu působí na materiál údery (rázy). Na povrchu předehřátého výkovku se vytváří okuje, které postupně odpadávají a nezůstávají vlisované do povrchu jako v předchozím případě. Výkovky jsou však prokovány jen do určité hloubky pod povrchem.

U volného kování je materiál tvářen rázy či tlakem. Ingoty či předvalky se takto prokovávají a zúží na potřebné rozměry. Používají se jednoduchá kovačská, jejichž velikost je přizpůsobena velikosti kovaného kusu. Základními kovačskými technikami volného kování jsou: pýchování, prodlužování, sekání, děrování, osazování apod. Pro podávání polotovaru mezi kovačská pak slouží manipulátory v různém konstrukčním provedení.

Nakonec zápusťkové kování je určeno pro výrobu velkého počtu tvarově stejných dílů. Tyto díly mohou být tvarově rozmanité a technologií se dosahuje vysokého stupně přesnosti. Ková se v zápusťkách, které jsou většinou děleny na horní a dolní. Zápusťky se vyrábějí z nástrojové oceli tak, aby odolávaly otěru a vysokým teplotám.

### **2.3.2.3 Tažení tyčového a profilového materiálu**

Tažení spočívá v protahování kovu otvorem průvlastku. Vyrábí se takto tyče a profily, dráty nebo dutý materiál. Provádí se na tažných stolicích, které existují na principu přímočarého pohybu nebo s navíjením. Průchodem v průvlastku se zmenšuje příčný průřez a současně se drát natahuje. Dosahuje se takto přesných tvarů a rozměrů s velmi dobrou jakostí povrchu. Zároveň se při tažení zlepšují mechanické vlastnosti. Nástroj se nepohybuje a je značně namáhán na otěr. Proto se vyrábí z velmi tvrdého materiálu (sliutý karbid, diamant) a významnou roli zde hraje mazání. To má za cíl snížení součinitele tření, vnitřního pnutí, odvádění tepla a zajištění hladkého povrchu průvlastku.

### **2.3.2.4 Protlačování**

Provádí se na protlačovadle, skládajícího se z průtlačnice a průtlačníku. Výrobkem je protlaček. V přetvárném elementu vzniká trojosá napjatost (všestranně tlaková). Technologie je vhodná pro materiály s dostatečně vysokou tažností ( $> 10\%$ ) a kontrakcí ( $> 50\%$ ) a oceli s obsahem uhlíku do  $0,2\text{ hm. } \%$ . Pro snížení tření mezi nástrojem a tvářeným materiálem se protlaček ošetřuje povrchovou úpravou (pozinkování, fosfátování, poměďování) nebo se uplatňuje mazání. Je možno dosáhnout velmi vysoké rozměrové přesnosti ( $\pm 0,05\text{ mm}$ ) a využití materiálu ( $90 - 100\%$ ). Oceli se běžně protlačují na více operací, měkčí materiály jako hliník a jeho slitiny na jednu operaci. V případě vyčerpání plasticity materiálu je prováděno mezioperační žíhání. Rozeznáváme protlačování dopředné, zpětné, sdružené a stranové.

## 2.4. Tažení plechů

U hlubokého tažení je hloubka výtažku větší, než je jeho největší příčný rozměr. Tato definice vymezuje primární rozdíl od tažení mělkého. Obecně jde o velmi produktivní metodu, díky které se dosahuje kýžených materiálových vlastností (vysoká tuhost a pevnost, hladký povrch, nízká hmotnost). V případě velkosériové výroby je tažení navíc velmi ekonomické. Největší uplatnění tato technologie najde v automobilovém, leteckém, potravinářském či elektrotechnickém průmyslu. Z pohledu výsledného tvaru pak lze táhnout nádoby rotačně symetrické, hranaté i nepravidelné.

### 2.4.1 Tažení se ztenčením stěny

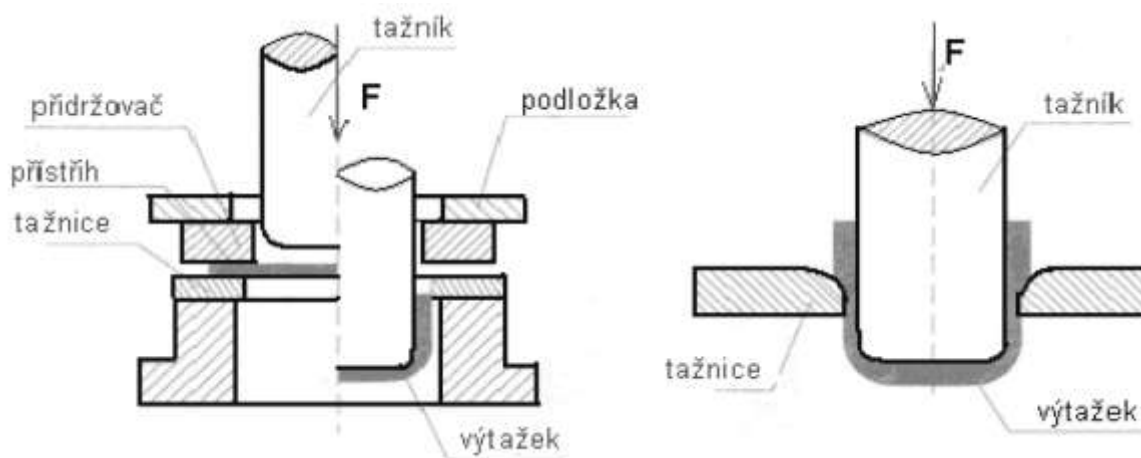
U tohoto typu tažení prakticky dochází k objemovému tváření, protože k prohlubování výtažku dochází s využitím původní tloušťky přístřihu, která se postupně zmenšuje (*obr. 3*). Mezi tažníkem a tažnicí je menší mezera, než je tloušťka plechu. Důležitá je tažná hrana matrice, která musí být pozvolná a velice odolná. Je totiž vystavována extrémnímu zatížení a také tření. Na dalším obrázku je vidět rotační nádoba, která byla vyrobena na 8 tažných operací.



Obrázek 3: Výtažek vyrobený tažením se ztenčením stěny [10]

### 2.4.2 Tažení bez ztenčení stěny

Na rozdíl od předešlé technologie je zde přítomna dodatečná vůle mezi nástroji, která je odvozena od tloušťky tvářeného plechu. Materiál je pak ohýbán a zatlačován do otvoru v matrici, přetahován přes její zaoblenou hranu. V tomto případě je ztenčení plechu zanedbatelné.



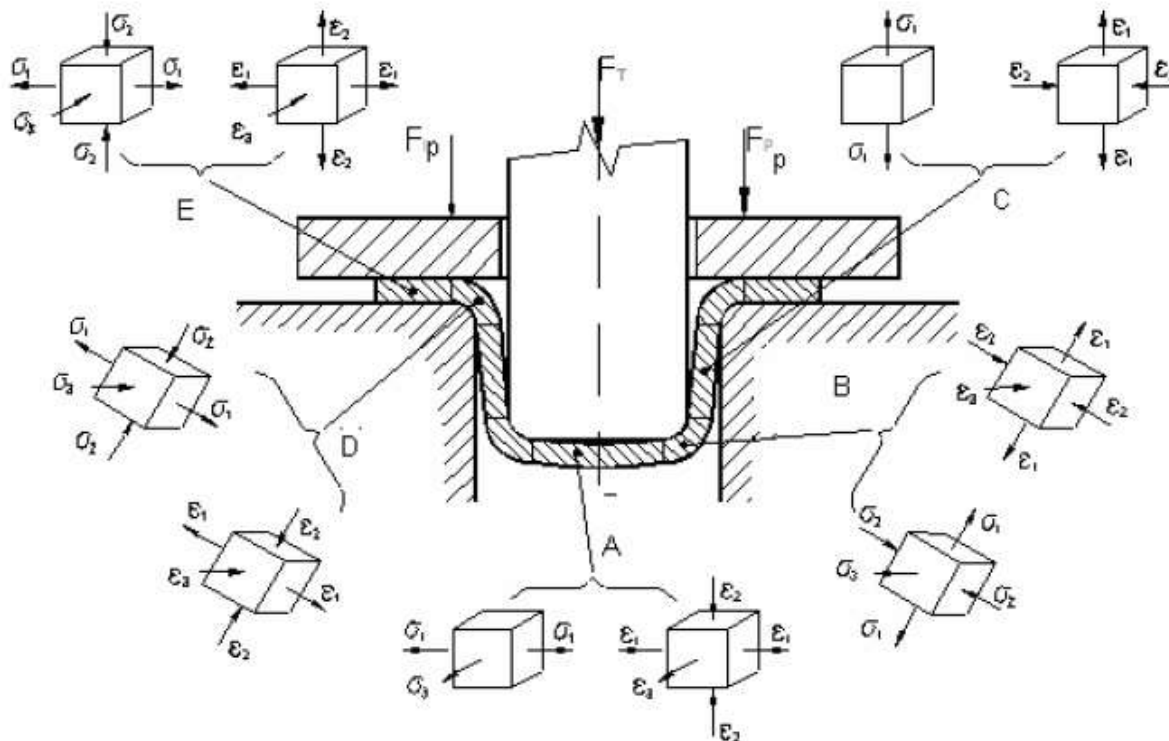
Obrázek 4: Technologie tažení bez ztenčení stěny (vlevo) a se ztenčením stěny (vpravo) [2]



Dalším zásadním rozdílem je užití přidržovače, který přitlačuje tvářený plech k tažnici a svou přidržovací silou reguluje tok materiálu. Zabraňuje tak vlnění plechu po jeho obvodě, což je jev, který je charakteristický pro tuto technologii. Velikost přístřihu je o vždy větší, než je otvor v matici. Lem plechu je pak v procesu namáhán radiálním tahovým napětím a tangenciálním tlakovým napětím. Tato kombinace napětí pak způsobuje zmíněné vrásnění, kterému je zapotřebí předejít. Součástí přidržovače bývá ještě brzdící kroužek (nebo obecně brzdící segment), který umocňuje efekt samotného přidržovače. Naproti tomuto členu je v oblasti někde před tažnou hranou matrice vytvořena drážka, do které tento kroužek zapadá. Materiál je pak brzdícím členem natlačen do drážky a vzniká oblast zvýšeného tření. U tvarově nepravidelných výtažků se toho využívá pro lokální regulaci tečení materiálu.

### 2.4.3 Napětí a deformace při tažení

Výtažek je rozdělen na 5 oblastí (dle obr. 5), které jsou odlišně namáhány i deformovány. To dává za vznik materiálové anizotropii, tedy rozdílných mechanických vlastností v různých směrech. Ve dně (část A) vzniká rovinná tahová napjatost a prostorová deformace (zeslabení dna je však zanedbatelné). Oblast přechodu dna ve stěnu (část B) je namáhána trojosým napětím (tahové v radiálním a tangenciálním směru, tlakové v příčném) a deformací. Válcová stěna (část C) je pod jednoosým tahovým zatížením a vykazuje rovinnou deformaci. Zde dochází k největšímu protahování plechu a hrozí utržení dna (kritické místo). Na tažné hraně (část D) dochází opět k prostorové napjatosti a deformaci viz následující obrázek. Materiál pod přidržovačem (část E) je namáhán tahem v radiálním směru a tlakem v tečném směru, zatímco povrch příruby je namáhán tlakem. [2]



Obrázek 5: Namáhání a deformace výtažku [2]

#### **2.4.4 Stroje**

Pro technologii tažení plechů se užívají hydraulické a mechanické lisy, které mohou být vertikálního či horizontálního provedení, jednočinné nebo vícečinné. Základní užité parametry lisů jsou jmenovitá síla, zdvih (jmenovitý, užitiný, pracovní), jmenovitá rychlost a hlavní rozměry pracovního prostoru. Dále také přesnost stroje, resp. celková tuhost pracovního prostoru

##### **2.4.4.1 Hydraulické lisy**

Silové stroje, které působí statickou silou (pro překonání deformačního odporu materiálu využívají převážně potenciální, tlakovou energii). Síla na beranu je oproti strojům pracujícím s akumulovanou energií konstantní (nezávislá na zdvihu) a u těchto strojů také existuje možnost její regulace. Je možno lisovat složitější tvary a přesnější výlisky, za cenu nižší produktivity oproti lisům mechanickým. Jsou tiché a pracují bez otřesů. Právě díky regulaci rychlosti a síly na výstupním členu jsou pro experimentální účely vhodné právě tyto lisy. Pro hluboké tažení tenkých plechů se nejčastěji používají hydraulické dvojčinné lisy, které kromě hlavního pohonu disponují ještě pohonem přidržovače.

##### **2.4.4.2 Mechanické lisy**

Klikové a výstředníkové lisy jsou v zásadě produktivnější a méně náročné na údržbu. I pro jejich jednoduchou konstrukci a nízké pořizovací náklady jsou velmi rozšířené. Síla a rychlost výstupního členu jsou funkcí zdvihu (zdvihové stroje) bez možnosti jejich dodatečné regulace. Součástí pohonu mechanických lisů bývá setrvačnický, který v průběhu pracovního zdvihu dodává energii společně s elektromotorem. Pracovní cyklus je dán jednou otáčkou klikového hřídele (výstředníku), který je základním prvkem těchto strojů. Pouze část celkového zdvihu ale představuje pracovní zdvih. Průběh síly lisu by měl co nejlépe odpovídat průběhu tvářecího odporu. Tyto stroje není možno přetěžovat nad jmenovitou sílu (může dojít k destrukci některé z částí pohonu).

### 2.4.5 Vady výtažků

Při procesu tažení může výtažek vykázat řadu vad, které jsou zpravidla zapříčiněny nevhodně zvolenými parametry tváření či špatnou volbou nástrojů. Potom je zapotřebí diagnostikovat příčiny vzniku dané vady a tvářecí proces patřičně přizpůsobit.

Mezi časté vady výtažků patří:

- vznik prasklin vlivem vyčerpání plasticity materiálu v místě největší deformace,
- prasknutí materiálu překročením meze pevnosti v tahu,
- vlny na plášti lze předejít správnou kalibrací tažné vůle mezi nástroji,
- vlnění příruby lze napravit zvětšením přitlaku přidržovače,
- vznik povrchových vrásek na výtažku např. zadíráním ve styku s nástrojem,
- nedodržení tvarové či rozměrové přesnosti výtažku.



Obrázek 6: Vady výtažků [3]

### 2.4.6 Mazání

Mazání je v případě tažení plechů neopomenutelné. Jeho funkcí je snížení tření mezi polotovarem a nástroji (tření má značný vliv na velikost tažné síly). Dále se mazáním snižuje opotřebení nástrojů, zamezuje zadírání a poškrábání taženého materiálu (vyšší kvalita výsledného povrchu). Cílem je pokrýt taženou plochu jemným, homogenním filmem, který odolá vysokým tlakům a následně ho lze snadno odstranit z hotového výlisku.

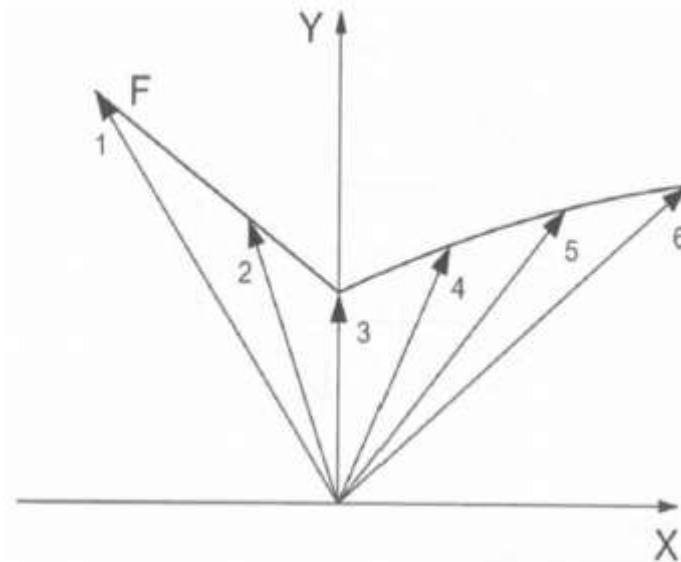
Používají se dva základní druhy maziv. Čistá kapalná maziva a maziva s plnidlem pro vysoké tlaky. Přidanou tuhou složku maziv (plnidlo) může být: mastek, plavená křída, grafit či oxid zinečnatý. Pro ty nejnáročnější podmínky jsou vhodná maziva s grafitem. Pro méně náročné tahy je možno užít řepkový nebo minerální olej. Obzvláště důležité je mazání při tažení korozivzdorné oceli, která má vyšší sklony k zadírání. [2]

## 2.5. Zkoušky hlubokého tažení

Tato kapitola se věnuje technologickým zkouškám tvařitelnosti plechů. Při hlubokém tažení dochází k zatěžování na hranici pevnosti materiálu, a proto je nutno detailně znát jeho mechanické vlastnosti. Tyto zkoušky cíleně napodobují napěťově-deformační stavy pro adekvátní způsoby výroby. Zjišťují se tak mezní stavy a potenciální využití zkoušeného materiálu pro danou výrobní technologii. Klasické mechanické zkoušky (zkouška tahem, zkoušky tvrdosti apod.) komplexní představu o vhodnosti plechu pro vybranou technologii neposkytují.

Cílem zkoušek je zjistit, jaký vliv má změna stavu napjatosti na křivku zpevnění u hlubokotažného materiálu. Dále se určuje křivka mezní tvařitelnosti (*FLC*), která je stěžejním prvkem diagramu mezní tvařitelnosti (*FLD*). Tento diagram (*viz obr. 7*) je výstupem snímacího zařízení (např. *ARAMIS*), které je popsáno v *kap. 2.5.8*. Pro dostatečný popis křivky mezní tvařitelnosti je vždy zapotřebí vícero vzorků různých geometrií tak, aby bylo dosaženo daného množství platných vzorků.

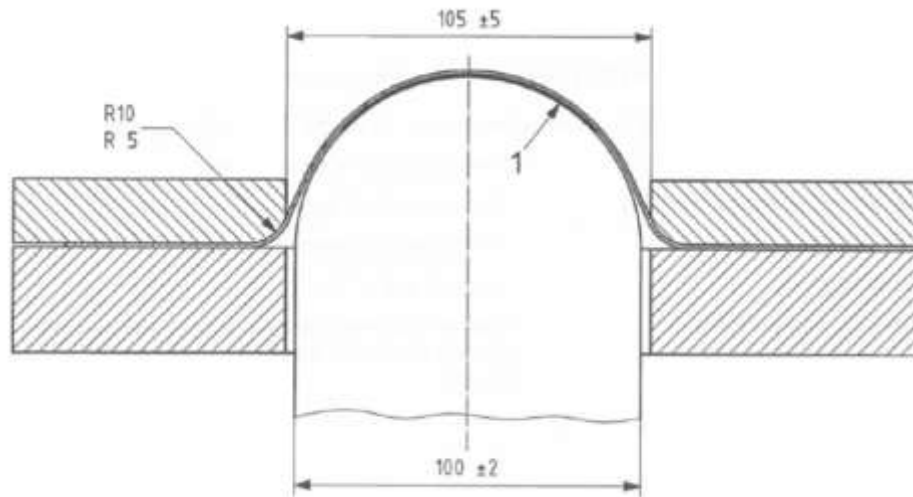
Na *obr. 7* je vykreslena *FLC* křivka. Osa *Y* představuje hlavní skutečnou deformaci  $\epsilon_1$  a osa *X* vedlejší skutečnou deformaci  $\epsilon_2$ . Křivka je v podstatě spojnicí mezních hodnot deformací, při kterých dojde k porušení vzorku. Různé typy deformací jsou podmíněny tvarem vzorků (*viz obr. 9*). Směr *1* představuje deformaci při jednoosém tahu (první tvar vzorku) a směr *2* přechodový stav deformace v tahu. Bod *3* znázorňuje porušení při rovinné deformaci. Směr *6* (poslední kruhový vzorek) pak odpovídá dvouosému stavu shodné tahové deformace (rozšiřování), kdy  $\epsilon_1 = \epsilon_2$  a směry *4* a *5* představují směry přechodových biaxiálních deformací. Do určité vzdálenosti pod křivkou se nachází hraniční zóna, která je svým způsobem riziková a je zapotřebí k dané křivce přistupovat s ohledem na možné předčasné porušení materiálu. V praxi se tato křivka využívá pro hodnocení deformačních schopností konkrétního materiálu a na jejím základě se pak adekvátně přistupuje k dané tvářecí technologii plechů.



Obrázek 7: FLC křivka (FLD diagram) [5]

### 2.5.1 Zkouška dle Nakajimy

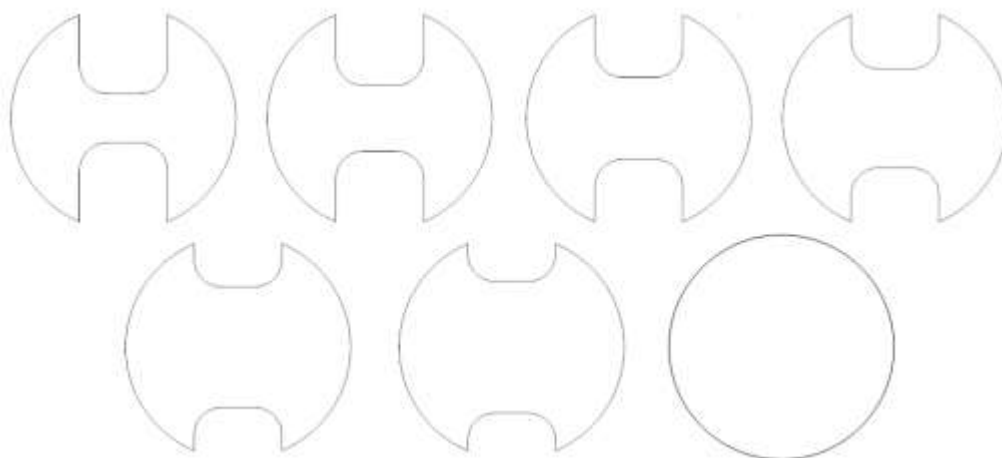
Zkouška je dána normou ČSN EN ISO 12004-2 a její princip je vidět na obr. 8. Polokulový tažník o průměru 100 mm je vtlačován do připraveného plechu, který je držen přidržovačem (tloušťka plechu je 0,3 až 4 mm, u oceli je maximální doporučená tloušťka 2,5 mm). Vypínáním plechu dochází k dvouosému namáhání, čímž se zkouška blíží reálné průmyslové výrobě. Zkouška probíhá do porušení materiálu a je monitorována fotogrammetrickým zařízením (viz kap. 2.5.6). [5]



Obrázek 8: Zkouška dle Nakajimy [5]

Trhlina by měla vzniknout přibližně uprostřed vzorku. Pokud se tak nestane a trhlina vznikne mimo osu, zkouška je neplatná. K této skutečnosti často dochází při nadměrném tření mezi nástrojem a zkoušeným vzorkem. Z tohoto důvodu se běžně užívá mazivo a speciální fólie, která se vkládá mezi kontaktní plochy tažníku a plechu.

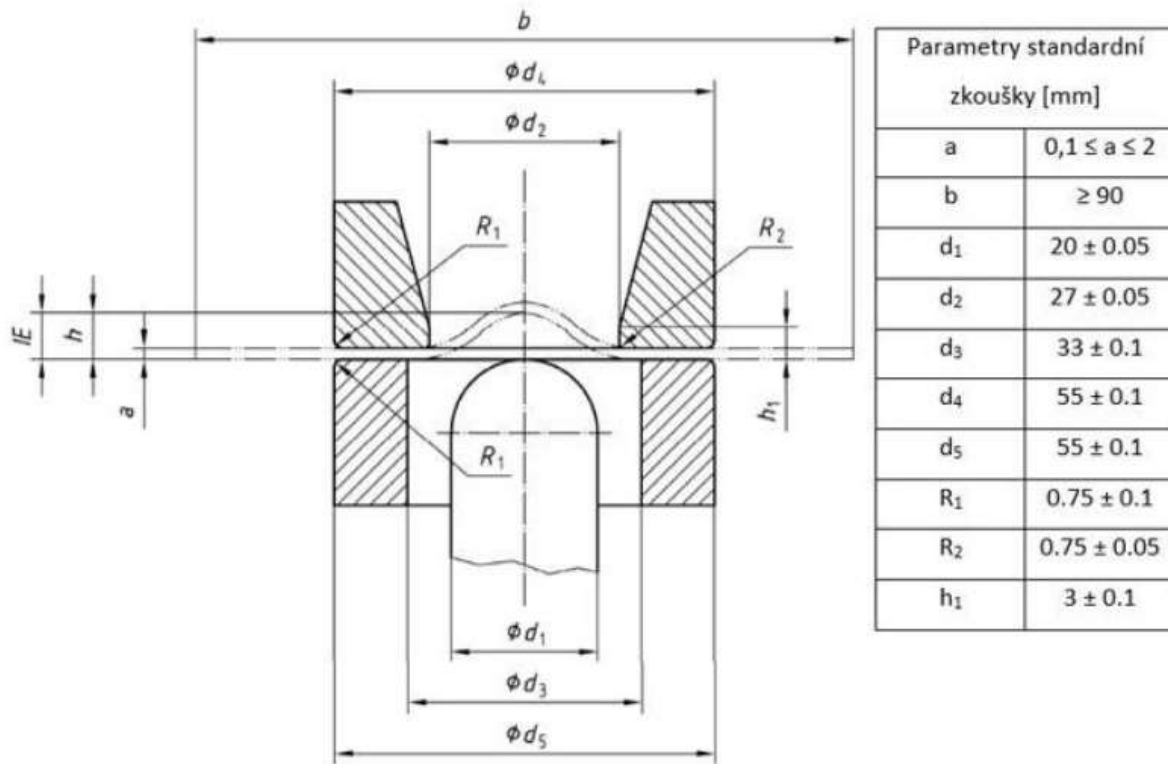
Dle uvedené normy je pro kompletní popis křivky mezní tvařitelnosti zapotřebí nejméně pět geometrií a u každé geometrie je nutno získat alespoň tři platné vzorky. Přitom se doporučuje rovnoměrné rozmístění FLC od jednoosého do dvojosého stavu shodné tahové deformace. Možné tvary vzorků jsou vidět na obrázku níže.



Obrázek 9: Tvary vzorků pro zkoušku dle Nakajimy [5]

### 2.5.2 Zkouška hloubením podle Erichsena

Zkušební plech o rozměrech  $90 \times 90 \text{ mm}$  je pevně upevněn mezi přidržovač a tažnici. Kulový trn o průměru  $20 \text{ mm}$  pak protlačuje vzorek otvorem v matrici. Dochází k hloubení plechu a zkouška probíhá do jeho porušení. Schéma zkoušky se standardními parametry jsou vidět na obrázku níže.

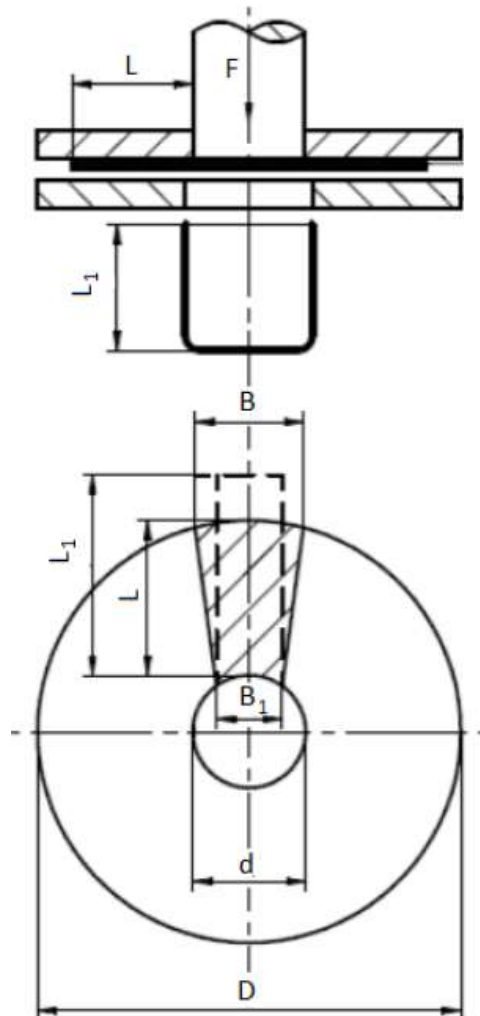


Obrázek 10: Zkouška hloubením dle Erichsena [4]

Zkouška je definována normou ČSN ISO 20482. Parametrem  $IE$  [mm] je označováno prohloubení plechu, kterého je dosaženo v momentě jeho destrukce (vznik viditelné trhliny v celé tloušťce vzorku). Zároveň je tato hodnota kritériem vhodnosti plechu k hlubokému tažení a je vedle samotného materiálu závislá na síle plechu. Po zkoušce se rovněž hodnotí poloha a směr trhliny, stejně jako hrubost povrchu dílku (ukazatel velikosti zrna zkoušeného materiálu). [4]

### 2.5.3 Zkouška kalíškovací

Tato zkouška je nenormalizovaná a užívá se pro hodnocení hlubokotažnosti tenkých plechů. Posuzuje se technologičnost tažení rotačních nádob. Zkouška se několikrát opakuje až do nalezení maximálního průměru rondelu  $D$ . Zkušební vzorek ( $D = d + 2L$ ) se táhne na kalíšek o délce  $L_1 > L$  (viz obr. 11). Zkouška dobře simuluje tažení válcového výtažku, ale je poměrně zdlouhavá.



Obrázek 11: Zkouška kalíškovací [4]

Hodnocenými parametry jsou velikosti součinitele tažení  $m$  a převrácené hodnoty stupně tažení  $K$ :

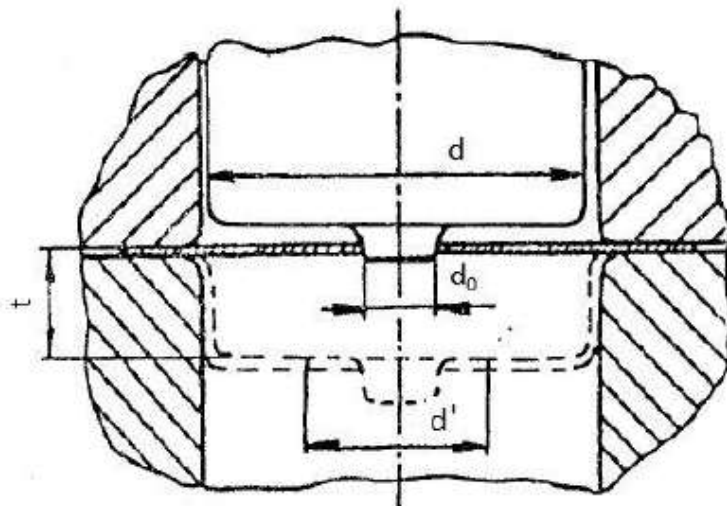
$$m = \frac{d}{D} [-], \quad K = \frac{D}{d} [-],$$

kde  $d$  je průměr tažníku,  $D$  je experimentálně zjištěný maximální průměr kruhového přístřihu a  $m$  je míra hlubokotažnosti získaná kalíškovací zkouškou. Čím je hodnota  $K$  větší, tím je plech způsobilější pro hluboké tažení. [4]

#### 2.5.4 Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa

Vzorkem pro tuto nenormalizovanou zkoušku je kruhový nebo čtvercový přístřih s kruhovým otvorem uprostřed. Tento vzorek je přidržován a vytahován válcovým tažníkem. Otvor uprostřed se rozšiřuje a po chvíli se kolem něj tvoří první radiální trhliny.

Vyhodnocuje se zde hloubka tahu, rozšíření otvoru a vliv anizotropie. Anizotropie materiálu se projeví nerovnoměrným rozšiřováním otvoru (vlivem deformačního zpevnění předešlým válcováním). Tady čím je větší prohloubení  $t$  a rozšíření otvoru  $d'$  a čím menší je plošná anizotropie, tím je plech vhodnější pro hluboké tažení. [4]



Obrázek 12: Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa [4]

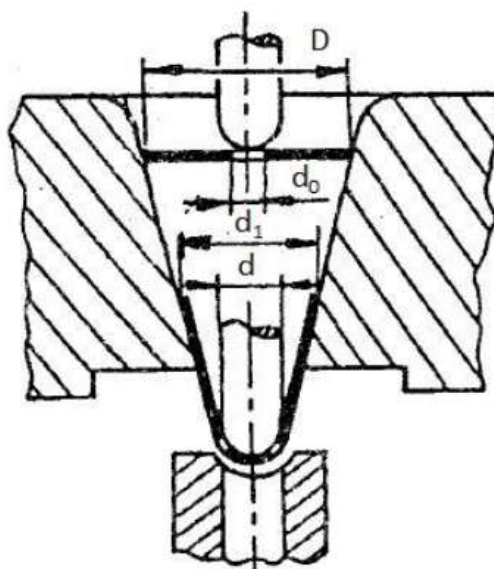
#### 2.5.5 Zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukuiho zkouška)

Princip spočívá v tažení kruhového rondelu, v němž může a nemusí být předvrtaný otvor. Podoba zkoušky je znázorněna na obr. 13. Trn zatlačuje plech do kuželové tažnice do chvíle vzniku trhliny v jeho otvoru nebo na dně výtažku. Zkouší se bez užití přidržovače.

Kritériem hlubokotažnosti plechu Fukuiho zkoušky je součinitel tažení  $m_F$ . Čím je tato hodnota nižší, tím je plech vhodnější k hlubokému tažení.

$$m_F = \frac{d_1}{D} [-],$$

kde  $d_1$  je největší průměr kuželového výtažku a  $D$  je průměr kruhového přístřihu. [4]

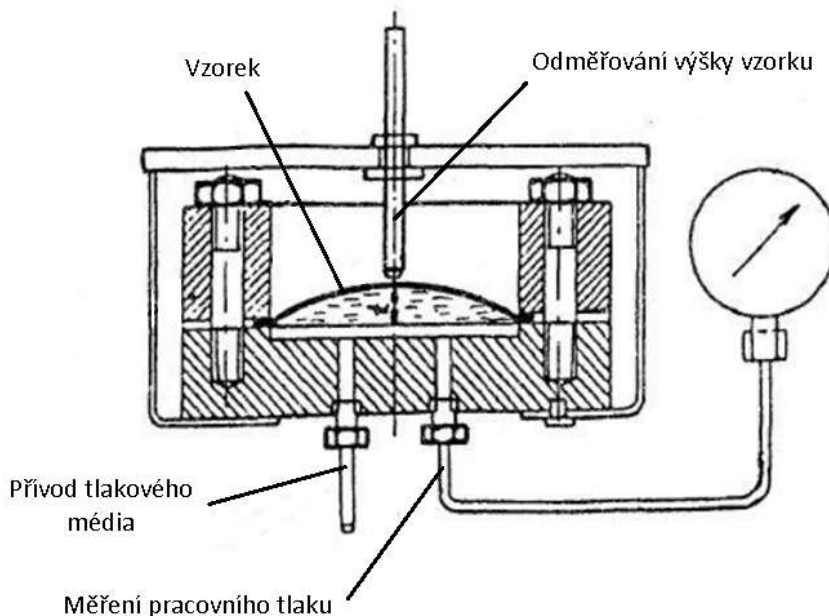


Obrázek 13: Fukuiho zkouška [4]



### 2.5.6 Zkouška hydraulická (Tomlenova)

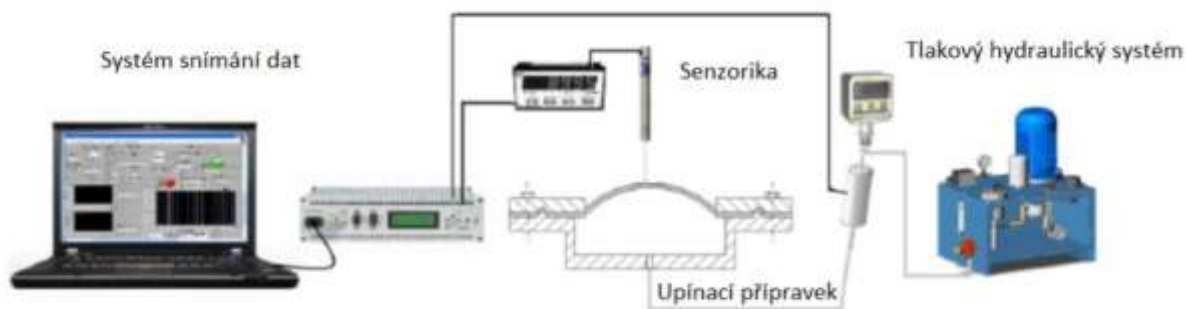
Zkušební vzorek je upnut dle *obr 14*. Tímto způsobem je pracovní prostor utěsněn proti úniku tlakové kapaliny, která je přiváděna do prostoru pod vzorkem. Vlivem zvyšování tlaku kapaliny se vzorek deformuje (vybouluje) až do porušení. Měří se největší prohloubení a zároveň se posuzuje tvar trhliny i celkový vzhled povrchu vzorku.



Obrázek 14: Hydraulická (Tomlenova) zkouška [4]

Na rozdíl od Erichsenovy zkoušky je tato metoda rychlejší a objektivnější. Hydraulická kapalina eliminuje nerovnoměrné tření mezi nástrojem a vzorkem a zároveň působí ve všech místech stejným tlakem. Nevýhodou je o něco složitější experimentální zařízení.

Tato zkouška se dnes používá jen zřídka a byla překonána tzv. *bulge testem*, u kterého je deformace vzorku snímána fotogrammetricky. (princip fungování viz *obr. 15*). Jedná se o pokročilou metodu, u které je možno sledovat průběh napětí a deformace vzorku a posléze sestavit křivku zpevnění a také posuzovat tažnost materiálu.



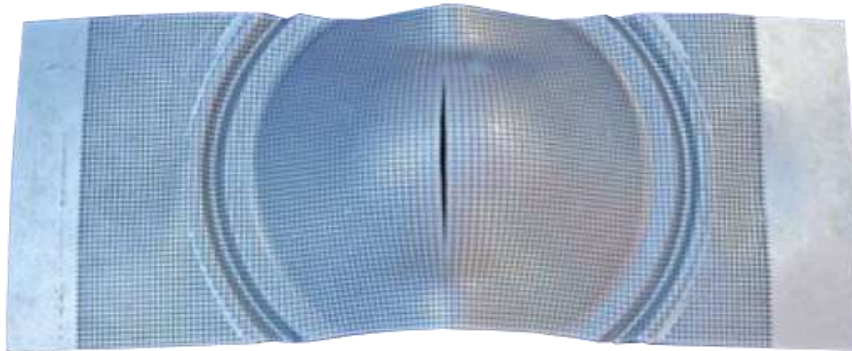
Obrázek 15: Schéma bulge testu [4]

### 2.5.7 Příprava vzorků

Zprvu je nutno nastříhat potřebné množství zkušebních vzorků. Různé tvary těchto vzorků určují konkrétní polohy bodů mezního přetvoření v *FLD*. Posléze se na vzorky nanese deformační síť, která může být tvořena buďto pravidelnou mřížkou nebo nástřikem v podobě stochastických obrazců.

#### Pravidelná síť – deterministické mřížky

Pravidelnou mřížku tvoří čtvercové nebo kruhové elementy, které se při tváření roztahují (nebo zužují) podle povahy deformace. Čtvercové elementy jsou použitelné v případě, že jsou známy směry hlavních napětí. Síť se v tomto případě nanese tak, aby byly elementy po deformaci obdélníkové, nikoli kosé. Kruhové elementy je možno použít kdykoliv a po deformaci jsou směry hlavních napětí určeny podle směrů hlavních a vedlejších os elips, do kterých se původní kruhy přetvoří. To však platí pouze pro případ, že se směry hlavních napětí nemění v průběhu zkoušky. V praxi se často používá kombinace obou typů sítí. Tyto mřížky je nutno nanášet bez vrubového účinku a změny mikrostruktury základního materiálu.



Obrázek 16: Pravidelná čtvercová síť na porušeném vzorku [13]

#### Stochastické obrazce

Po odmaštění a očištění povrchu vzorku technickým benzinem a acetonem se nanese bílý akrylátový nástřik (celý povrch vzorku) a dále náhodný nástřik černé akrylátové barvy. Barva by měla být matná pro eliminaci případných odlesků. Dále musí být zajištěna dostatečná přilnavost k povrchu, aby nedocházelo k odlupování barvy. Doporučuje se nanášet povrchovou úpravu před těsně samotným testováním.



Obrázek 17: Náhodný (stochastický) nástřik vzorku před a po zkoušce [14]

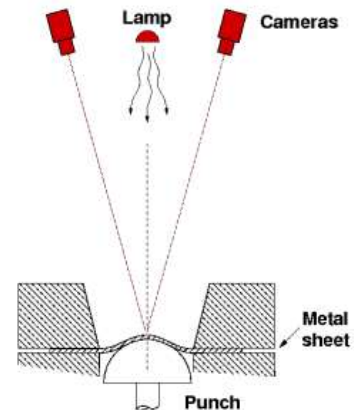
### 2.5.8 Měření systémem ARAMIS

V případě automatického měření deformací tažených vzorků se využívá principu fotogrammetrie. To je vědní obor, který se zabývá zpracováním informací na fotografických snímcích nebo snímaných objektech. Konkrétněji je jejím cílem rekonstrukce tvarů, měření rozměrů a určování polohy objektů, které jsou předmětem zkoumání. Toho se dá využít právě pro velmi přesné měření deformačního chování zkoumaných plechů (analýza 3D povrchu). Je možno sledovat a zaznamenat kinematické a dynamické chování vzorků (např. hlavní a vedlejší deformace, rychlost deformace, prostorová posunutí a rychlosti apod.).

ARAMIS je optický měřicí systém firmy GOM, který umožňuje bezkontaktní snímání průběhu deformačních zkoušek při statickém i dynamickém zatěžování. Systém se skládá ze dvou kamer (pro snímání 3D prostoru) a fokusovaného osvětlení, které při správném nastavení efektivně snímají vymezený prostor. Důležité je nastavení úhlu svíraného kamerami (ten je dán vzdáleností kamer od snímaného objektu a vzájemnou vzdáleností od sebe). Obecně svírají úhel 25°. Pro snímání rovinné deformace postačí pouze jedna kamera. Tyto kamery disponují vysokým rozlišením a vysokou snímkovací frekvencí. Zároveň je zařízení vybaveno laserem pro optimální kalibraci přístroje.

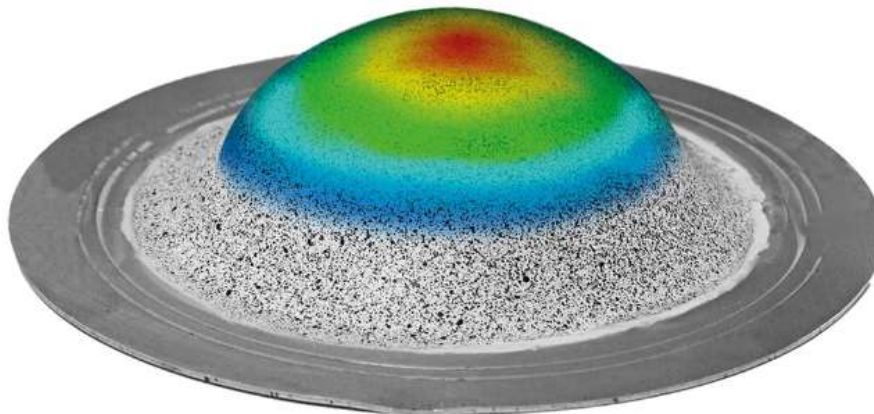


Obrázek 19: Soustava kamer a osvětlení systému ARAMIS [1]



Obrázek 18: Poloha snímacího zařízení [7]

Systém ARAMIS ke svému měření využívá stochastického nástríku naneseného na povrch plechu. Tento kontrastní pattern se deformuje současně s deformovaným objektem a optikou jsou zaznamenávána posunutí jednotlivých bodů sítě. Výsledkem je barevná mapa deformací zkoumaného vzorku.



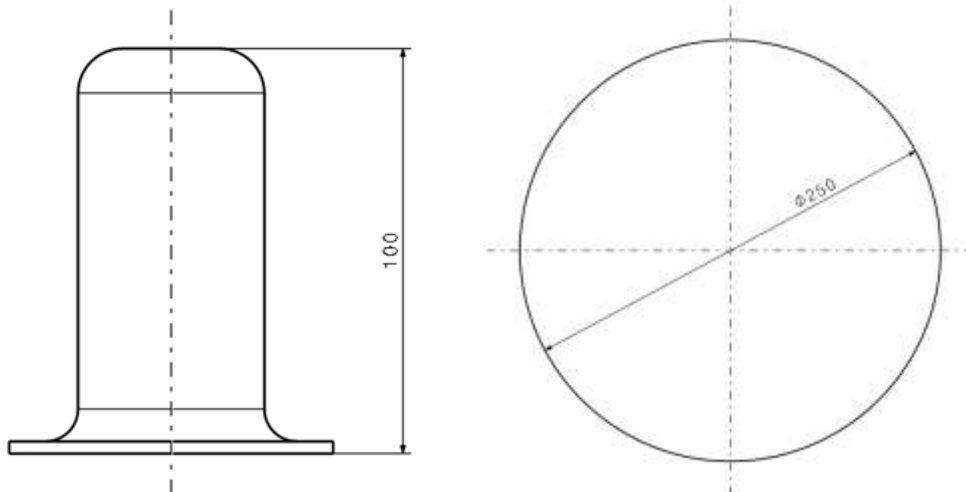
Obrázek 20: Deformovaný vzorek v systému ARAMIS [15]

### 3 Požadavky na stroj

Souhrn funkčních, kapacitních a rozměrových požadavků na stroj vychází ze strany společnosti *COMTES FHT* a dále ze základních principů hlubokého tažení. Navrhovaná únosnost stroje je vyvozena z nejnáročnějších tažných operací, které firma provádí a je navýšena o  $30\% \pm 1\%$ . Předností tohoto stroje má být snadno přístupný pracovní prostor a rychlá a jednoduchá výměna nástrojů a přestavby na hydraulickou zkoušku - bulge test. Maximální rozměry výtažku, resp. přístřihu určují potřebné rozměry pracovního prostoru stroje. Je nutno brát v úvahu rozevření nástrojů pro možnost vyjmutí výtažku a také zvětšení nástrojových ploch pro funkci přidržovací. V případě tažení výtažku o  $\varnothing 250\text{ mm}$  bude nutno nástroje (tažnice, přidržovač) zvětšit až na  $\varnothing 450\text{ mm}$ . Maximální zatížení stroje je pak dáno součtem minimální síly na tažníku a maximální síly na přidržovači. Pro společný hlavní pohon tažníku a přidržovače dochází k distribuci síly hlavního pohonu na tyto dva nástroje.

Souhrn požadavků na stroj:

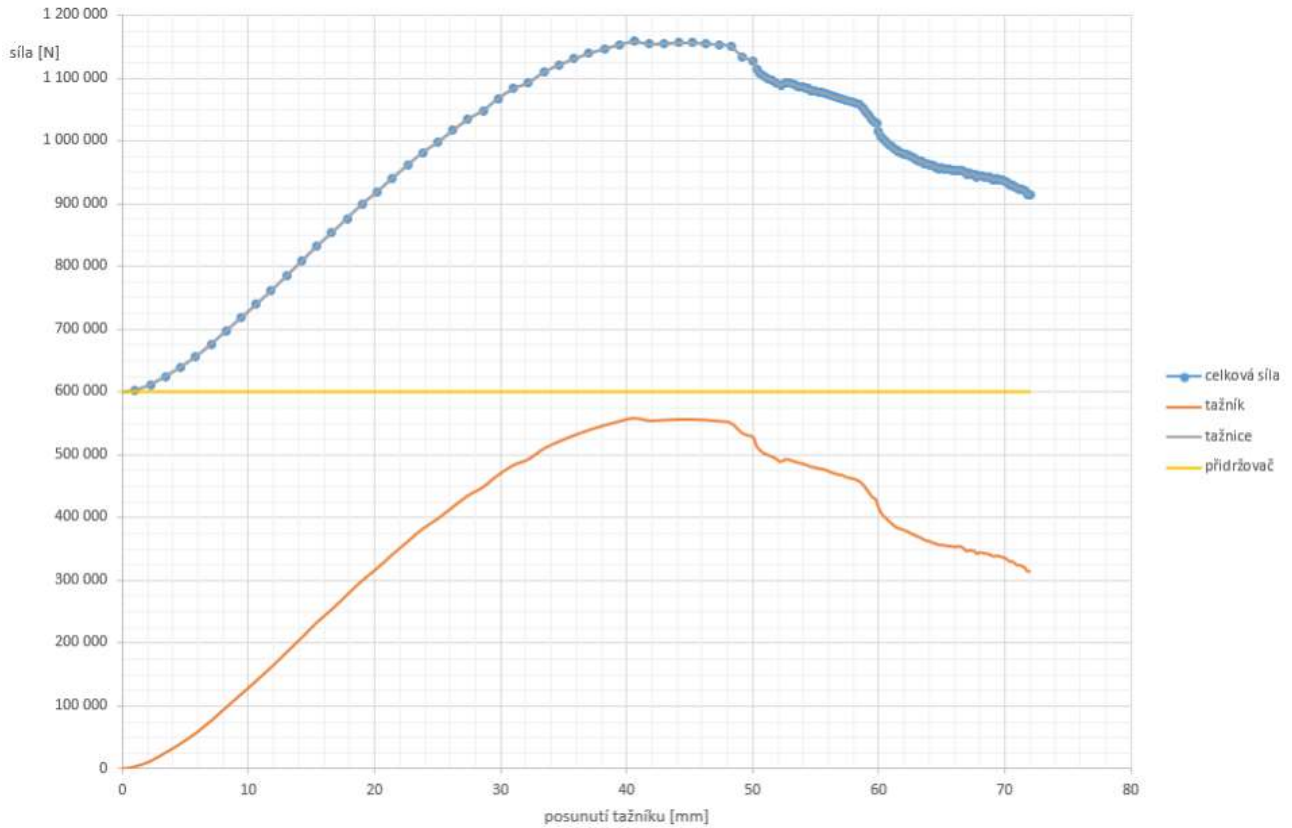
- ▶ Jednoduchá a rychlá výměna nástrojů
- ▶ Regulovatelná síla na přidržovači
- ▶ Volný prostor nad nástroji pro sledování vyhodnocovacím zařízením
- ▶ Přístupnost pracovního prostoru
- ▶ Možnost přestavby na bulge test
- ▶ Maximální rozměry výtažku dle obrázku:



Obrázek 21: Maximální hloubka výtažku a průměr přístřihu

- ▶ Min. síla na tažníku: 800 kN
- ▶ Max. síla na přidržovači: 700 kN
- ▶ Max. zatížení stroje: 1,5 MN

Následující graf představuje záznam z tažení firmy *COMTES FHT*, který slouží jako podklad pro konstrukční návrh stroje. Z grafu lze odečíst přednastavená síla na přídržovači  $600\text{ kN}$  a síla na tažníku, která postupně vystoupala až na zhruba  $560\text{ kN}$ .



Obrázek 22: Graf průběhu sil na zkušebním vzorku

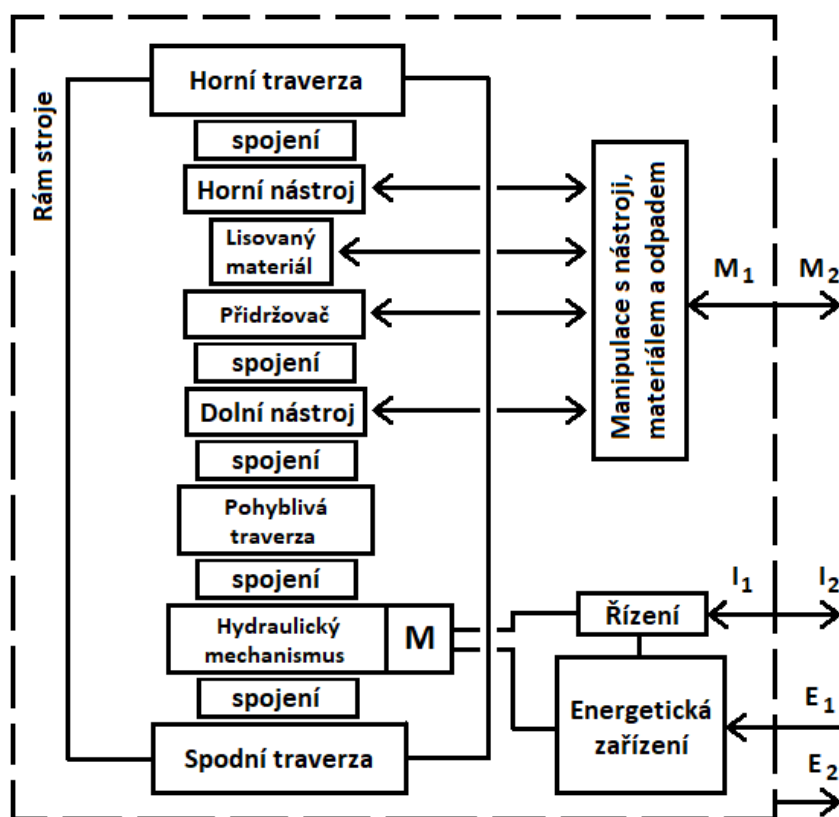
## 4 Návrh variant

### 4.1. Základní koncepce stroje

Hluboké tažení je kvazistatický proces. Vysoké síly působí malými rychlostmi a nároky na přesnost výroby nejsou příliš vysoké. Jako stroj vhodný pro hluboké tažení a experimentální účely byl zvolen vertikální dolnotlaký hydraulický lis. Tyto lisy mají ve srovnání s těmi mechanickými určité výhody jako možnost regulace výstupní síly a rychlosti, které jsou nezávislé na zdvihu. Produktivita zařízení zde nehraje důležitou roli. Pohon stroje lze navíc krátkodobě přetížít bez rizika destrukce některé z jeho částí.

Vertikální konstrukce je volena proto, že zde odpadá problém s upínáním vzorku (polotovaru), který tak lze před zkouškou pouze položit na desku přidržovače. Současně může být hlavní pohon řešen jako jednočinný a do výchozí polohy se dostane s využitím gravitační síly, která vytlačí olej z válce zpět do nádrže. Pohyb nástroje je řešen zdola nahoru, protože je takto možno snadno snímat průběh deformace kamerami umístěnými nad pracovním prostorem stroje.

Hydraulický lis přetváří působením vnitřní struktury vstupní materiál  $M_1$  na výsledný materiál  $M_2$ . To se děje čerpáním energie  $E_1$  pohonným ústrojím (elektromotor + hydraulické čerpadlo) a s využitím informací  $I_1$  řídicích signálů ze skříně rozvaděče. Výstupními informacemi  $I_2$  jsou např. napěťově-deformační stavy tvářeného materiálu snímané optickým systémem a síla na tažníku zaznamenávána siloměrem. Výstupní energie  $E_2$  se pak může projevovat vznikem tepla a hluku.



Obrázek 23: Struktura navrhovaného systému



## 4.2. Varianty

V této kapitole jsou představeny a porovnány jednotlivé varianty provedení stroje. Nejdříve z pohledu konstrukce rámu a v druhé části z pohledu umístění pohonů a kinematiky nástrojů.

### 4.2.1 Rám

Základním stavebním prvkem lisu je jeho rám, do kterého jsou přenášeny veškeré působící síly. Řešení rámu má zásadní vliv na parametry celého stroje (tuhost, přístupnost, hmotnost apod.), a proto je mu věnována zvláštní pozornost. Vybrané možnosti jeho provedení jsou uvedeny v tab. 2. Uzavřené rámy mají větší tuhost, ale omezenou přístupnost pracovního prostoru. Stejně to je i s rostoucím počtem sloupů, které mohou mít kromě funkce nosné také vodící. Další roli při návrhu hraje ekonomický faktor a je vždy nutno zvážit způsob výroby a návaznost jednotlivých částí lisu tak, aby bylo dosaženo přijatelného poměru cena/výkon.

Tabulka 1: Morfologická matice řešení rámu stroje

Rám	C	O	A	
Typ rámu	Montovaný	Svařovaný	Litý	
Provedení	Stojinové	Sloupové	Lamelové	Nedělené
Počet sloupů/stojin	1	2	3	4
Materiál rámu	Litá ocel	Litina	Ocel	
Traverzy	Frézované	Lité	Svařované	Skládané

V dalších třech tabulkách je sestaveno 5 variant rámu lisu, které jsou pak obodovány a porovnány. Význam hodnoceného parametru je roznásoben s přidělenými body a součet těchto bodů rozhoduje o celkovém pořadí a způsobilosti rámu pro danou aplikaci. Posuzovaná kritéria jsou přístupnost pracovního prostoru, tuhost konstrukce, hmotnost a náklady na výrobu.

Tabulka 2: Varianty provedení rámu lisu

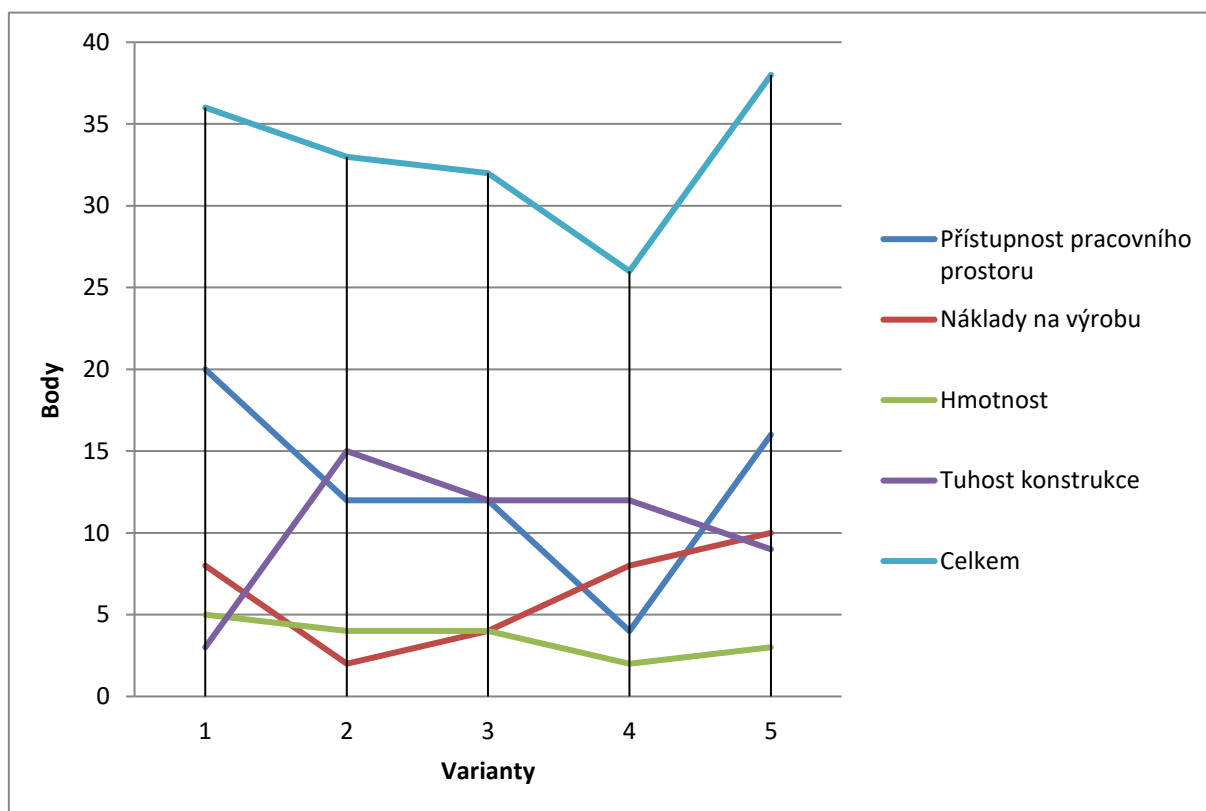
Varianty	1	2	3	4	5
Rám	C	A	O	O	O
Typ rámu	Montovaný	Litý	Svařovaný	Montovaný	Montovaný
Provedení	Lamelové	Nedělené	Stojinové	Sloupové	Sloupové
Počet sloupů/stojin	1	2	2	4	2
Materiál rámu	Ocel	Litina	Litá ocel	Ocel	Ocel
Traverzy	-	-	Lité	Svařované	Frézované

Tabulka 3: Kriteriaální hodnocení variant

Bodovací tabulka	1	2	3	4	5	Váha
Přístupnost pracovního prostoru	5	3	3	1	4	4
Náklady na výrobu	4	1	2	4	5	2
Hmotnost	5	4	4	2	3	1
Tuhost konstrukce	1	5	4	4	3	3
<b>Celkem</b>	<b>15</b>	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	

Tabulka 4: Přepočtené hodnoty variant dle významu kritérií

Přepočtené hodnoty	1	2	3	4	5	Ideál
Přístupnost pracovního prostoru	20	12	12	4	16	20
Náklady na výrobu	8	2	4	8	10	10
Hmotnost	5	4	4	2	3	5
Tuhost konstrukce	3	15	12	12	9	15
<b>Celkem</b>	<b>36</b>	<b>33</b>	<b>32</b>	<b>26</b>	<b>38</b>	<b>50</b>



Obrázek 24: Graf hodnocení variant

Z výsledků vyšla nejlépe varianta provedení 5, tedy seskládaný dvousloupový rám s obráběnými traverzami. Jelikož se předpokládá, že se tento stroj bude vyrábět pouze v množství jednoho kusu (kusově), vyplatí se obrobit přebytečný materiál namísto vyrábění odlévací formy. Oproti variantě 1 (lamelový C-rám) vychází uzavřený rám lépe z hlediska celkové tuhosti.

Tabulka 5: Konečné pořadí variant

Pořadí	Varianta	Body
1.	5	38
2.	1	36
3.	2	33
4.	3	32
5.	4	26

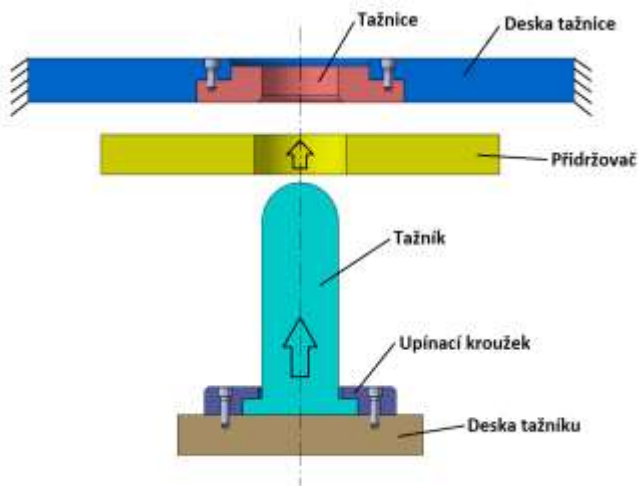


#### 4.2.2 Kinematika nástrojů

Dalším bodem návrhu bude způsob vyřešení pohybu jednotlivých nástrojů. Desky tažníku, přídržovače a tažnice se pohybují vůči sobě vždy ve směru tažnice proti přídržovači a tažník proti tažnici. Tyto pohyby lze vyřešit mnoha způsoby za předpokladu, že vždy jeden z nástrojů stojí a zbylé dva se pohybují.

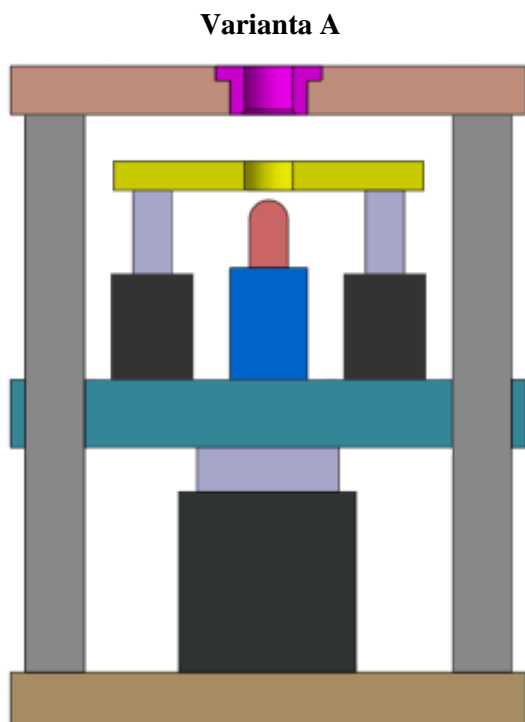
##### 4.2.2.1 Pohon přídržovače a tažníku

První případ představuje pevná tažnice a poháněný přídržovač s tažníkem. Na obr. 26 a 27 jsou znázorněny varianty dolního a horního pohonu přídržovače. Preferovaná je varianta s dolním pohonem (var. A), protože je tak nad horní traverzou potřebný prostor pro záznam sledovacím zařízením. Tato varianta je výhodnější také z pohledu manipulace s nástroji a materiálem v pracovním prostoru stroje. Velikost prostoru mezi tažnicí a přídržovačem je v první řadě dána volbou hlavního pohonu a jeho zdvihem.

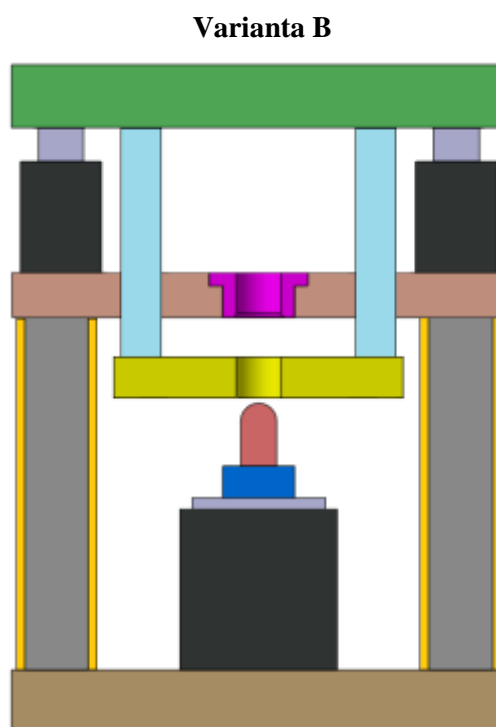


Obrázek 25: Kinematika nástrojů - pevná tažnice

Výhodou varianty B je fakt, že je zde rozdělena síla tažníku a přídržovače na separátní pohony. To se projeví menšími rozměry hlavního hydraulického válce a úsporou místa v dolní části stroje. Horní traverza je pevně spojena s přídržovačem (deskou přídržovače) a celá soustava je zvedána vedlejším pohonem umístěným v horní části lisu. Buďto může být vedena horní traverza po sloupech nebo sloupky přídržovače tělem příčky tažnice.



Obrázek 26: Varianta A

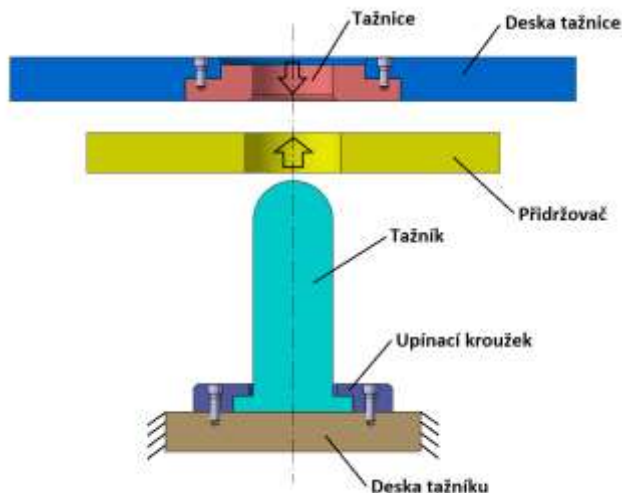


Obrázek 27: Varianta B

#### 4.2.2.2 Pohon přidržovače a tažnice

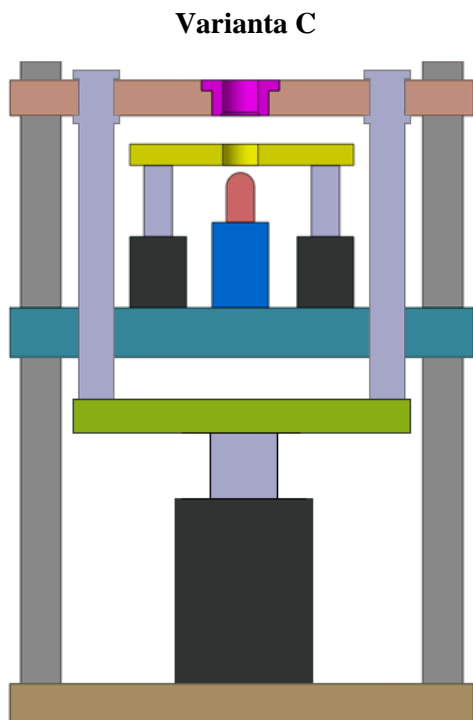
Varianta s pevným tažníkem je opět představena ve dvou variantách, kdy u jedné je tažnice poháněna zespoda (varianta C) a u druhé shora (varianta D). Při tažení plechu vzniká deformace na vrcholu tažníku, který se nepohybuje. Kamery tedy mohou být zaostřeny na menší oblast a lépe se zaměřit na místo porušení vzorku. Teoreticky to může vést k dosažení o něco lepších výstupů.

V případě dolního pohonu je opět dosaženo potřebného prostoru nad strojem, ale konstrukce je celkově podstatně složitější. Hlavní pohon zde musí zajistit zpětný pohyb desky tažnice nahoru, takže je zapotřebí dvojitý hydromotor. Při pohybu tažnice směrem dolu dojde k dosednutí na přidržovač a pak se oba nástroje pohybují společně. Hlavní pohon zde proto musí být opět dimenzován na jmenovitou sílu stroje a z obrázku je patrné, že by toto řešení nebylo příliš výhodné. Je zde zapotřebí přídavná deska, která je sloupky spojena s horní vedenou traverzou.

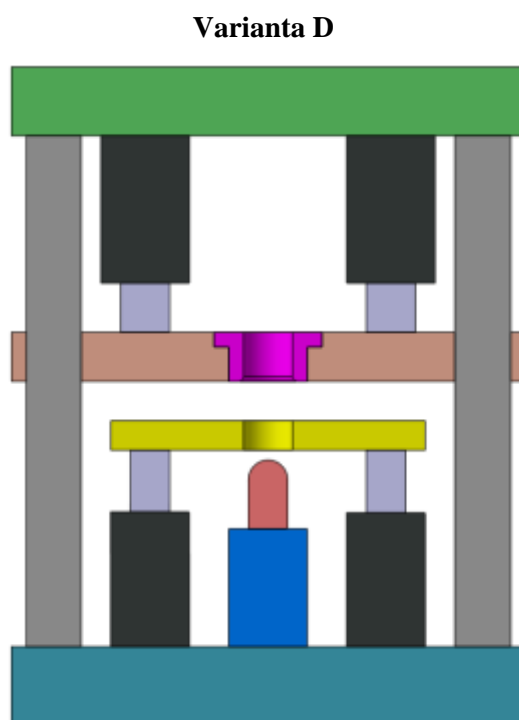


Obrázek 28: Kinematika nástrojů - pevný tažník

V druhém případě je princip podobný, ale je nutné rozdělit pohon desky tažnice minimálně na dva válce. Výhodou druhé varianty je menší potřebná výška lisu a také jednodušší provedení bez nutnosti přídavné desky nesoucí horní příčku. To by se projevilo výraznou úsporou hmotnosti stroje, ale prostor nad tažnicí zde není otevřený.



Obrázek 29: Varianta C

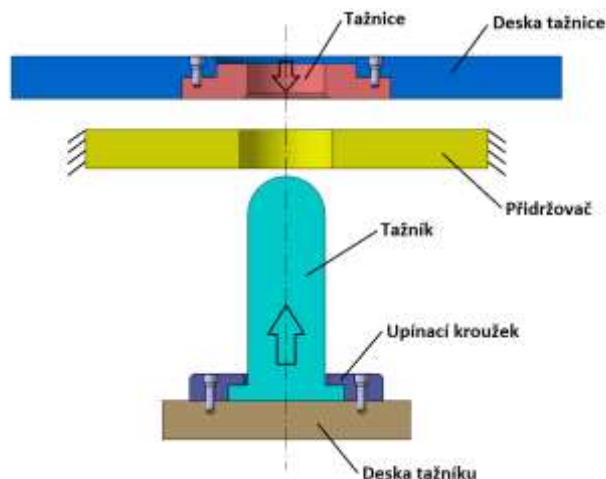


Obrázek 30: Varianta D

#### 4.2.2.3 Pohon tažníku a tažnice

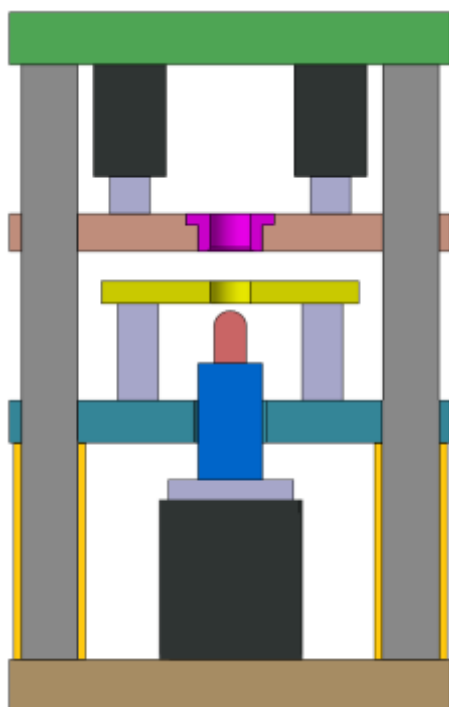
Případ pevného přídržovače s sebou nese spíše nevýhody předešlých dvou variant. To kvůli kombinaci pohonů nástrojů, která je prostorově náročná s konstrukce lisu složitá.

Výhodou varianty F může být nízká výška nad podlahou, díky pohonům tažnice umístěným na krajích lisu. Dále pak dobře přístupný pracovní prostor. Nevýhodou je naopak jeho záběrná plocha.



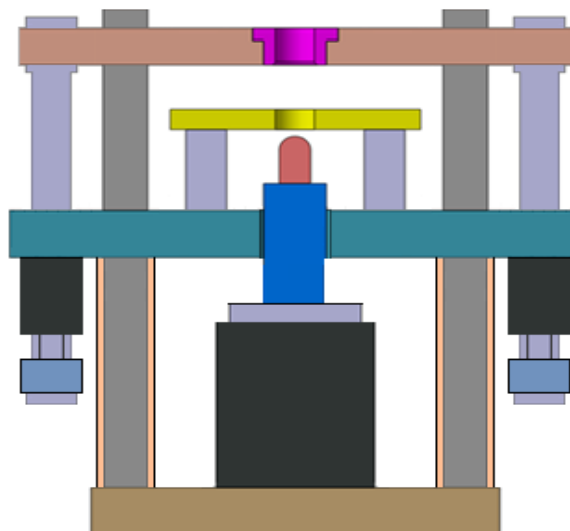
Obrázek 31: Kinematika nástrojů - pevný přídržovač

#### Varianta E



Obrázek 32: Varianta E

#### Varianta F



Obrázek 33: Varianta F

#### 4.2.2.4 Zhodnocení variant

Ze šesti představených variant byla jako nejvhodnější zvolena varianta A se spodním pohonem tažníku i přídržovače. Její hlavní výhody jsou jednoduchost konstrukčního provedení, snadno přístupný pracovní prostor a také otevřený prostor nad horní nástrojovou příčkou. Varianty B, D a E jsou právě kvůli tomuto nedostatku zavrženy. Druhým přípustným provedením je varianta C (spodní pohon tažníku i tažnice), která rovněž splňuje hlavní požadavky kladené na stroj. Předností této varianty je fakt, že je oblast deformace a následného porušení vzorku z pohledu vyhodnocovacích kamer statická, což může být výhodou. Problém ale je v relativně komplikovaném pohonném ústrojí. Horní příčka může být poháněna např. mezi sloupy dle varianty C nebo vně sloupů dle varianty F. Dvojitý hydraulický válec táhne traverzu dolu a posléze ji navrácí zpět do výchozí polohy. To se děje prostřednictvím přidavné desky, která tuhou vazbou svazuje pohyb hnacího a výstupního členu. Právě pro potřebu nižšího počtu prvků, potažmo prostorovou a hmotnostní úsporu je vybrána varianta A.

## 5 Analytické výpočty

Cílem výpočtů je navrhnout a překontrolovat základní rozměry stroje (rám, pohon) a siloměru. Tyto výpočty slouží jako podklad pro modelový návrh a následnou strukturální analýzu.

### 5.1. Návrh a kontrola rámu

#### 5.1.1 Návrh horní traverzy

V příčce vzniká při tváření ohybové a smykové napětí. Pro jednoduchost návrhu je smykové napětí zanedbáno, protože v celkovém součtu hraje minoritní roli. Traverza je zatížena centricky a její střed je místem největšího ohybového momentu.

Materiál traverzy: ČSN 11 523 ( $\sigma_{k\_tr} = 355 \text{ MPa}$ ,  $E_{tr} = 210 \text{ GPa}$ )

Dovolené napětí v traverze pro bezpečnost  $k_{tr} = 3$ :

$$\sigma_{D\_tr} = \frac{\sigma_{k\_tr}}{k_{tr}} = 118,33 \text{ MPa}$$

Zatížení traverzy:  $F = F_{tr} = 1,5 \text{ MN}$  (síla přidržovače a síla tažníku)

Výpočtovým modelem je nosník na dvou podporách zatížený osamělou silou uprostřed.

**Navržené rozměry:**

$$l_{tr} = 670 \text{ mm}, \quad \frac{l_{tr}}{2} = 335 \text{ mm}$$

Šířka traverzy:  $b_{tr} = 520 \text{ mm}$

**Reakce v podporách a ohybový moment:**

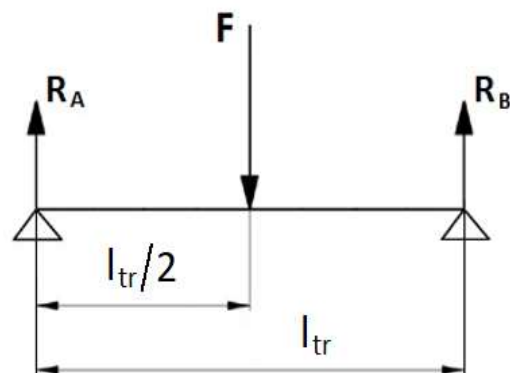
$$R_A = R_B = \frac{F_{tr}}{2} = 750 \text{ kN}$$

$$M_{o\_tr\_max} = \frac{F_{tr} \cdot l}{4} = 251\,250 \text{ Nm}$$

**Výška traverzy  $h_{tr}$ :**

$$W_{o\_tr} = \frac{M_{o\_max}}{\sigma_{D\_tr}} = \frac{b \cdot h_{tr}^2}{6}$$

$$h_{tr} \geq \sqrt{\frac{6 \cdot W_{o\_tr}}{b}} = 157 \text{ mm}$$



Obrázek 34: Výpočtový model horní traverzy

Pro dané rozměry je volena výška traverzy  $170 \text{ mm}$ . Toto navýšení má společně s bezpečností  $k_{tr} = 3$  kompenzovat fakt, že traverza ve skutečnosti není plná, ale obsahuje průhledový středový otvor. Správnost tohoto návrhu je překontrolována MKP simulací v závěru práce.

### 5.1.2 Návrh sloupů

Ve sloupu vzniká napětí tahové a ohybové. Tentokrát je při návrhu počítáno pouze s tahovým napětím, které je stěžejní. Konstrukce lisu je dvousloupová, takže je celková síla rozdělena na polovinu do každého sloupu. Sloupy budou na obou koncích opatřeny závity (pro sloupové matice), jejichž malý průměr představuje nejmenší průměr sloupu.

Materiál sloupů: ČSN 12 050 ( $\sigma_{k\_sl} = 325 \text{ MPa}$ ,  $E_{sl} = 210 \text{ GPa}$ )

Dovolené napětí ve sloupu pro bezpečnost  $k_{sl} = 3$ :

$$\sigma_{D\_sl} = \frac{\sigma_{k\_sl}}{k_{sl}} = 108,33 \text{ MPa}$$

Zatížení sloupu:  $F_{sl} = 0,75 \text{ MN}$

Z dovoleného namáhání je vypočten minimální průměr sloupu:

$$S_{sl} \geq \frac{F_{sl}}{\sigma_{D\_sl}}$$

$$d_{sl} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot F_{sl}}{\pi \cdot \sigma_{D\_sl}}} = 93,9 \text{ mm}$$

S ohledem na průměry dostupných sloupových matic volen průměr sloupu  $d_{sl} = 120 \text{ mm}$ .

### 5.1.3 Rozměry rámu

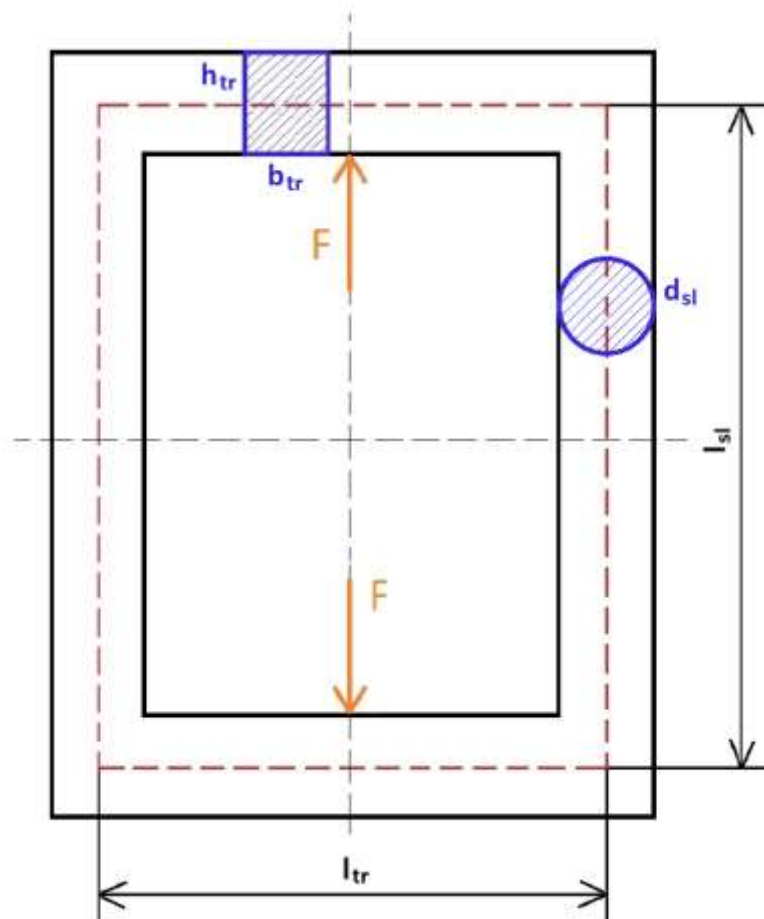
Rám hydraulického lisu je tvořen horní a dolní travézou, které jsou pevně spojeny dvěma sloupy po stranách. Sloupy navíc vedou střední travézu poháněnou hlavním pohonem a nesoucí soustavu nástrojů a pohon přidržovače. Výpočtový model bude zjednodušen využitím střední čáry profilu, která je na obrázku vyznačena červenou přerušovanou čarou. Střední čára profilu je myšlená čára, která spojuje těžiště průřezů ve všech místech příček a sloupů.

Tabulka 6: Parametry horní travézy

Traverza		
$h_{tr}$	170	[mm]
$b_{tr}$	520	[mm]
$l_{tr}$	670	[mm]
$S_{tr}$	88 400	[mm <sup>2</sup> ]
$W_{o\_tr}$	2 504 667	[mm <sup>3</sup> ]
$J_{o\_tr}$	212 896 667	[mm <sup>4</sup> ]

Tabulka 7: Parametry sloupu

Sloup		
$d_{sl}$	120	[mm]
$l_{sl}$	1 600	[mm]
$S_{sl}$	11 310	[mm <sup>2</sup> ]
$W_{o\_sl}$	98 175	[mm <sup>3</sup> ]
$J_{o\_sl}$	10 178 760	[mm <sup>4</sup> ]



Obrázek 35: Okno rámu

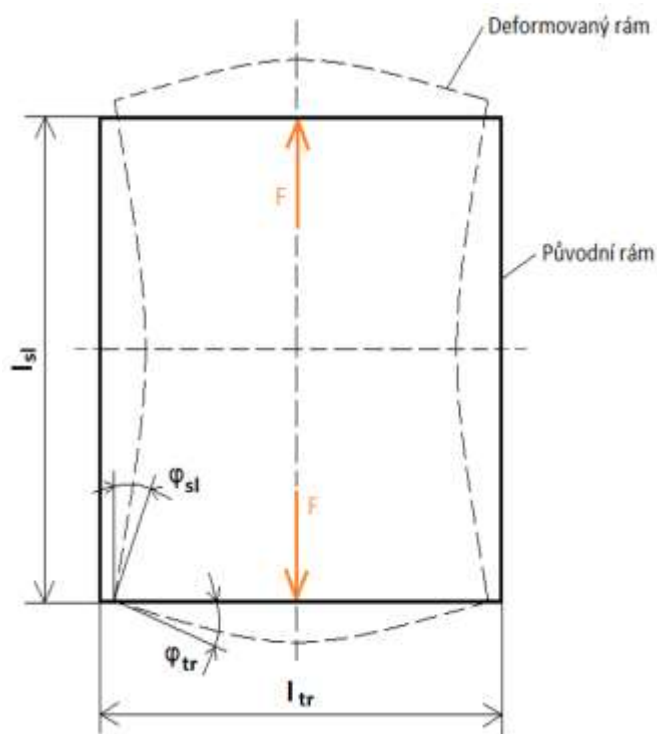
Toto rámové okno je zatíženo pracovní silou  $F = 1,5 \text{ MN}$  (předpoklad symetrické úlohy).

### 5.1.4 Kontrola rámu

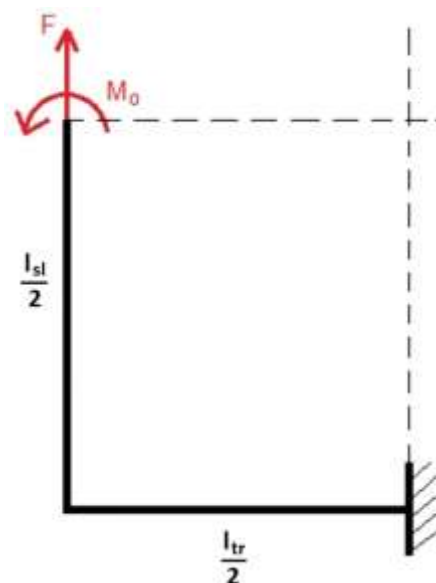
Následující výpočty představují komplexnější kontrolu rámu lisu bez zanedbávání silových účinků a za předpokladu pevného spojení sloupů a příček.

#### 5.1.4.1 Výpočtový model

Protože traverzy a sloupy tvoří uzavřený obrazec, úloha je jedenkrát staticky neurčitá. Obrazec je však symetrický podle dvou os, a proto lze počítat jen s jednou čtvrtinou rámu (obr. 37). Staticky neurčitou veličinou je ohybový moment  $M_o$ , který lze spočítat z předpokladu, že úhly natočení  $\varphi_p$  a  $\varphi_s$  se rovnají. Tato podmínka je vyvozena z tvrzení, že úhel střední čáry profilu mezi příčkou a sloupem se během deformace nemění. V rozích rámu je tedy zachován konstantní úhel  $90^\circ$ . Deformace střední čáry profilu rámu při jeho zatížení je přibližně znázorněna na následujícím obrázku.



Obrázek 36: Deformace rámu



Obrázek 37: Výpočtový model rámu lisu

#### 5.1.4.2 Výpočet ohybového momentu a napětí

Úhel natočení traverzy:

$$\varphi_{tr} = \frac{1}{E_{tr} \cdot J_{o\_tr}} \cdot \left( \frac{F \cdot l_{tr}^2}{16} - M_o \cdot \frac{l_{tr}}{2} \right)$$

Úhel natočení stojiny:

$$\varphi_{sl} = \frac{1}{E_{sl} \cdot J_{o\_sl}} \cdot \left( M_o \cdot \frac{l_{sl}}{2} \right)$$





### Napětí v traverze:

V traverze vzniká napětí ohybové a smykové. Výsledné redukované napětí je spočteno metodou  $\tau_{max}$  a  $\sigma_{D\_tr} = 118,33 \text{ MPa}$ .

$$\sigma_{o\_tr} = \frac{\frac{F \cdot l_{tr}}{4} - M_o}{W_{o\_tr}} = 100,3 \text{ MPa}$$

$$\tau_{s\_tr} = \frac{F}{S_{tr}} = 17 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{red\_tr\_HMH} = \sqrt{\sigma_{o\_tr}^2 + 4 \cdot \tau_{s\_tr}^2} = 105,9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{red\_tr\_HMH} < \sigma_{D\_tr}$$

### Napětí ve stojině:

Stojiny jsou namáhány na tah a na ohyb. Výsledné napětí se zjistí prostým součtem obou normálových napětí a  $\sigma_{D\_sl} = 108,33 \text{ MPa}$ .

$$\sigma_{t\_sl} = \frac{F_{sl}}{S_{sl}} = 66,3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{o\_sl} = \frac{M_o}{W_{o\_sl}} = 8,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max\_sl} = \sigma_{t\_sl} + \sigma_{o\_sl} = 74,8 \text{ MPa}$$

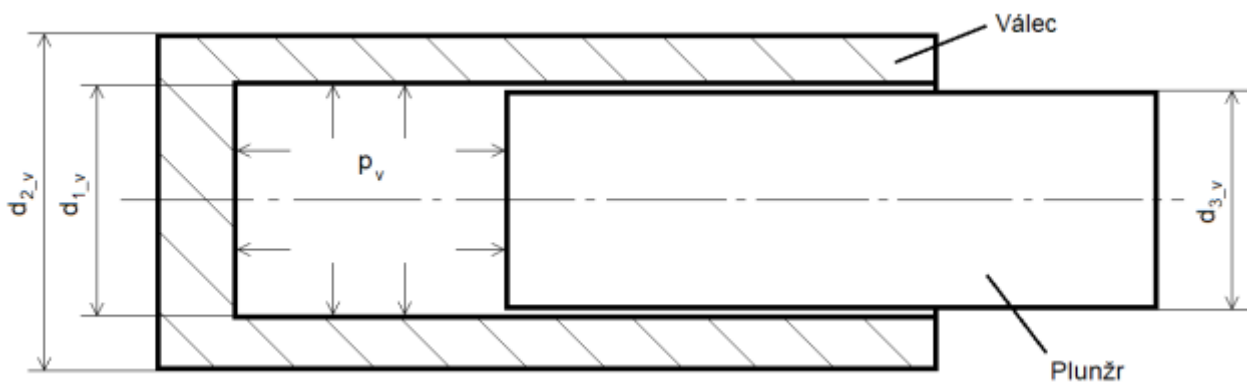
$$\sigma_{max\_sl} < \sigma_{D\_sl}$$

## 5.2. Návrh hlavního pohonu

V této kapitole je okrajově dimenzován hlavní pohon - plunžrový jednočinný hydromotor. U hlavního pohonu je počítán potřebný rozměr plunžru pro vyvození požadované síly  $F = 1,5 \text{ MN}$  při tlaku  $p_v = 25 \text{ MPa}$  a minimální tloušťka stěny hydraulického válce. Potřebný zdvih hydraulického válce činí  $h_v = 320 \text{ mm}$ . Pohon přidržovače je vyřešen na způsob plynových (dusíkových) pružin s akumulátorem. Tyto pružiny budou nakupované s ohledem na požadovanou únosnost.

### 5.2.1 Návrh plunžru hlavního pohonu

$$d_{3_v} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot p_v}} = 276,4 \text{ mm}$$



Obrázek 39: Schéma hydraulického pohonu

Podle dostupných plunžrových ucpávek volen průměr plunžru  $d_{3_v} = 280 \text{ mm}$  a vnitřní průměr válce  $d_{1_v} = 310 \text{ mm}$ . Plunžr je pro výraznou redukci jeho hmotnosti možno vyrobit dutý.

Skutečná vyvozená síla  $F_{skut_v}$  činí:

$$F_{skut_v} = \frac{p_v \cdot \pi \cdot d_{3_v}^2}{4} = 1,539 \text{ MN}$$

### 5.2.2 Výpočet stěny pracovního válce

Jako materiál pracovního válce je uvažována ocel ČSN 11 700.1 ( $\sigma_{k_v} = 350 \text{ MPa}$ ). Pro dovolené namáhání s bezpečnostním koeficientem  $k_v = 3$  platí:

$$\sigma_{D_v} = \frac{\sigma_{k_v}}{k_v} = 116,67 \text{ MPa}$$

Tloušťka stěny válce je počítána využitím Mohrovy hypotézy *HMH*, kdy  $k_{v\_HMH}$  je koeficient tloušťky stěny válce a je odvozen z dovoleného namáhání  $\sigma_{D\_v}$  a působícího hydraulického tlaku  $p_v = 25 \text{ MPa}$ . Průběh radiálního, obvodového a tečného napětí ve stěně válce je vyobrazeno na následujícím obrázku s teoretickým předpokladem, že vnější tlak je roven nule.

$$k_{v\_HMH} = \sqrt{\frac{\sigma_{D\_v}}{\sigma_{D\_v} - \sqrt{3} \cdot p_v}} = 1,261$$

$$d_{2\_v} \geq k_{v\_HMH} \cdot d_{1\_v} = 390,9 \text{ mm}$$

Vnější průměr válce volen  $d_{2\_v} = 400 \text{ mm}$ .

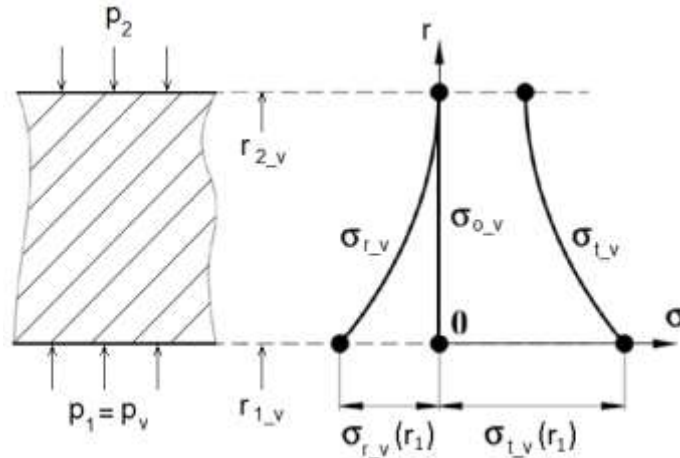
### 5.2.3 Kontrola navržené stěny válce

Za předpokladu, že vnější tlak  $p_2 = 0$ , pro jednotlivé složky napětí ve válci platí:

$$\sigma_{r\_v}(r_1) = -p_v = -25 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t\_v}(r_1) = -\frac{p_v \cdot r_{1\_v}^2}{r_{1\_v}^2 - r_{2\_v}^2} - \frac{p_v \cdot r_{2\_v}^2}{r_{1\_v}^2 - r_{2\_v}^2} = 100,2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{o\_v} = 0 \text{ MPa}$$



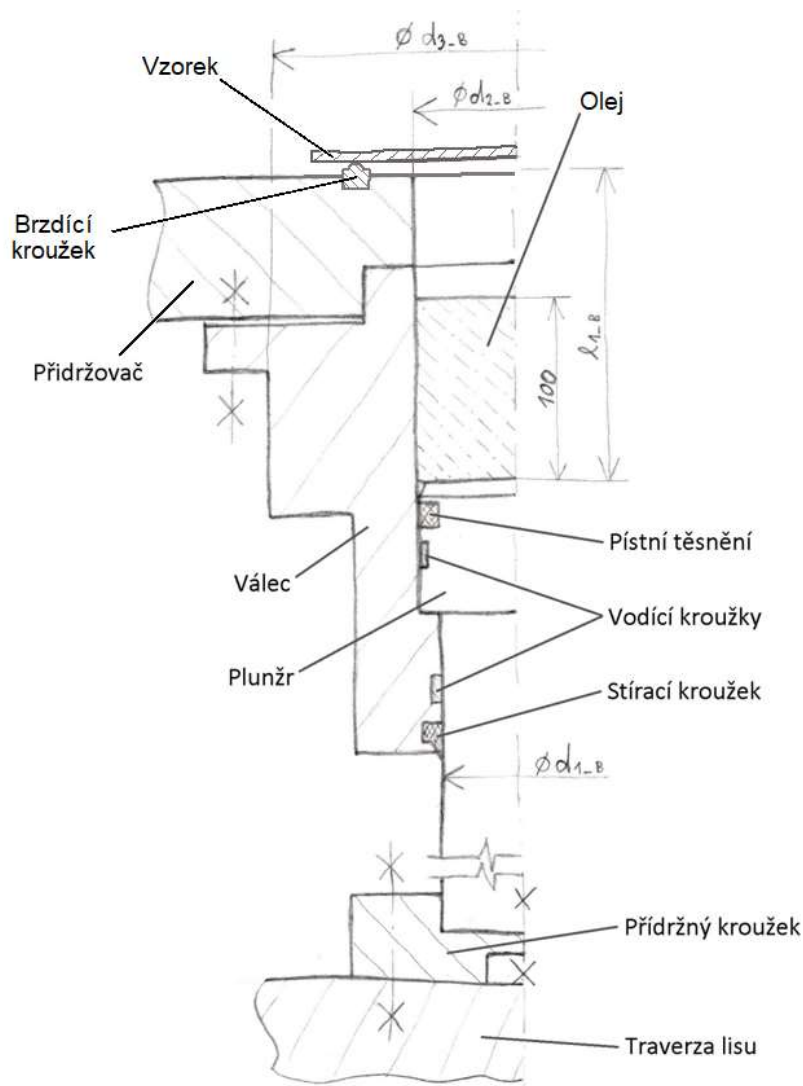
Obrázek 40: Průběhy napětí ve stěně válce

Osově napětí ve válci je nulové vzhledem k charakteru jeho upevnění k dolní traverze lisu. Kontrola výsledných napětí je provedena opět podle teorie *HMH*:

$$\sigma_{red\_v}(HMH) = \sqrt{\sigma_{r\_v}^2 + \sigma_{o\_v}^2 + \sigma_{t\_v}^2 - \sigma_{r\_v} \cdot \sigma_{o\_v} - \sigma_{o\_v} \cdot \sigma_{t\_v} - \sigma_{t\_v} \cdot \sigma_{r\_v}} = 114,8 \text{ MPa} < \sigma_{D\_v}$$

### 5.3. Návrh sestavy pro bulge test

Nástrojová sestava pro zkoušky bulge je navržena dle obr. 41. Hydraulický válec je umístěn na doraz ve vybrání na spodní straně přídržovače a je k němu přišroubován prostřednictvím navažené příruby. Na spodní straně je plunžr připevněn přes přídržovací kroužek k pohyblivé traverze lisu a tím je zajištěn zpětný pohyb plunžru při pohybu dolu. Potřebné množství oleje je možno nalít horním otvorem nebo vyvrtat přívod a umístit šroubení do stěny válce pod přídržovačem. Odvzdušnění prostoru pod vzorkem se provede pomalým vytlačení média až do prostoru ohraničeným brzdícím kroužkem. Nakonec se na hladinu položí vzorek a zkouška může proběhnout



Tabulka 8: Rozměry bulge

$d_{1\_B}$	90	mm
$d_{2\_B}$	100	mm
$d_{3\_B}$	310	mm
$l_{1\_B}$	150	mm

Obrázek 41: Návrh nástroje pro bulge test

Rozměr  $l_{1\_B}$  je požadovaný zdvih plunžru. Dále je kontrolován průměr plunžru na tlakové namáhání a stěna válce pracovní části na vnitřní přetlak. Soustava bude zatížena tlakem  $p_B = 60 \text{ MPa}$ , což při průměru plunžru  $d_{2\_B} = 100 \text{ mm}$  odpovídá vyvozené síle  $F_B$  o velikosti:

$$F_B = \frac{p_B \cdot \pi \cdot d_{2\_B}^2}{4} = 471,239 \text{ kN}$$

### 5.3.1 Kontrola plunžru

Nyní je nutná kontrola průměrů  $d_{1_B}$  a  $d_{3_B}$ . Malý průměr plunžru je zatížen tlakem od síly  $F_B$ . Materiál plunžru je ocel ČSN 12 050 ( $\sigma_{k_{p_B}} = 350 \text{ MPa}$ ) a dovolené napětí při  $k_{p_B} = 3$  je:

$$\sigma_{D_{p_B}} = \frac{\sigma_{k_{p_B}}}{k_{p_B}} = 116,67 \text{ MPa}$$

Tlakové napětí v plunžru je:

$$\sigma_{d_{p_B}} = \frac{4 \cdot F_B}{\pi \cdot d_{1_B}^2} = 74,1 \text{ MPa} \leq \sigma_{D_{p_B}}$$

### 5.3.2 Kontrola stěny válce

Tloušťka stěny válce pro bulge je kontrolována podobně jako v případě válce hlavního pohonu. Materiál válce je opět ocel ČSN 11 700.1 ( $\sigma_{k_{v_B}} = 350 \text{ MPa}$ ). Pro dovolené namáhání s bezpečnostním koeficientem  $k_{v_B} = 3$  platí:

$$\sigma_{D_{v_B}} = \frac{\sigma_{k_{v_B}}}{k_{v_B}} = 116,67 \text{ MPa}$$

Pro jednotlivé složky napětí ve válci platí:

$$\sigma_{r_B}(r_1) = -60 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{t_B}(r_1) = 100 \text{ MPa}$$

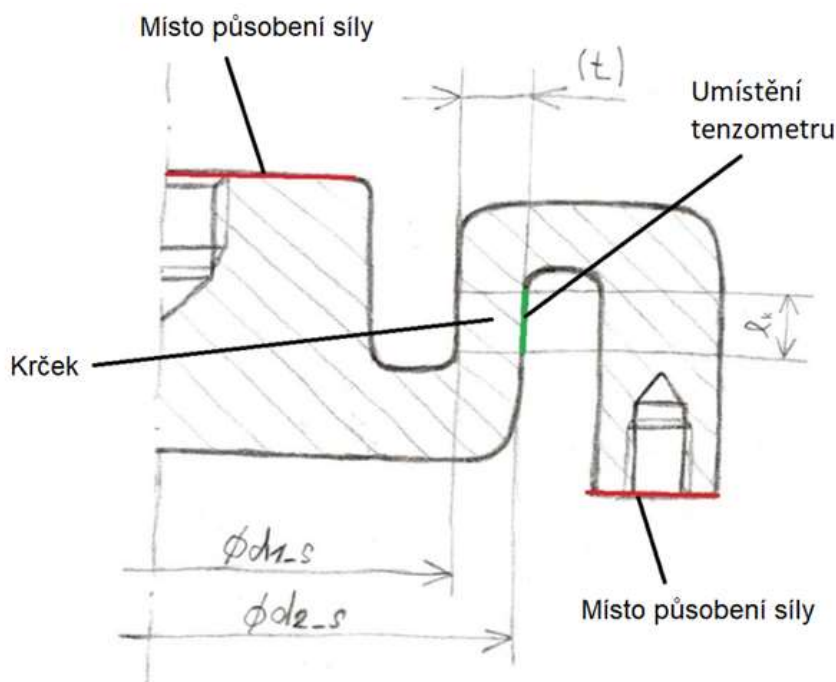
$$\sigma_{o_B} = 0 \text{ MPa}$$

Osové napětí ve válci je opět nulové. Kontrola výsledných napětí podle teorie *HMH*:

$$\sigma_{red_B}(HMH) = 116,6 \text{ MPa} < \sigma_{D_{v_B}}$$

## 5.4. Návrh siloměru

Pro měření síly na tažníku je navrhován tlakový tenzometrický snímač síly. Tento snímač bude umístěn v oblasti mezi středovou traverzou a samotným nástrojem. Firma *COMTES* si tento siloměr je schopna vyrobit na svém pracovišti s nižšími výrobními náklady, než je pořizovací cena dostupných snímačů. Princip siloměru (obr. 42) spočívá v působení tlakové síly, která se projeví určitou deformací krčku ve středové části průřezu. Snímač je totiž z jedné strany opřen o jeho periferní část a z druhé strany o jeho středovou část. Krček je po obvodě polepen tenzometry a změnou poměrného odporu tenzometrů při natahování zúžené části je následně odvozena působící síla. Na obrázku níže jsou zaneseny důležité rozměry pro návrh tak, aby siloměr odolal působícímu napětí a aby poměrná deformace krčku vyhovovala parametrům běžných tenzometrů. Rozměr  $l_k$  je rovná délka krčku mezi přechodovými rádií. Počítá se s umístěním tenzometrů dlouhých 10 mm.



Obrázek 42: Návrh siloměru

Tabulka 9: Parametry siloměru

$d_{1-s}$	196	mm
$d_{2-s}$	216	mm
$l_k$	15	mm
$t$	10	mm
$S_k$	6 472	mm <sup>2</sup>

### 5.4.1 Kontrola napětí v oblasti krčku

Siloměr je uvažován z materiálu ČSN 16 640 s mezí kluzu  $\sigma_{k-s} = 735 \text{ MPa}$ . Pro dovolené namáhání s bezpečnostním koeficientem  $k_s = 4$  platí:

$$\sigma_{D-s} = \frac{\sigma_{k-s}}{k_s} = 183,8 \text{ MPa}$$

Pro tahovou složku napětí v oblasti krčku při uvažování síly  $F_t = 800 \text{ kN}$  platí:

$$\sigma_{t-s} = \frac{F_t}{S_k} = 124 \text{ MPa}$$

Vyšší bezpečnostní koeficient je volen kvůli zanedbání napětí od ohybového momentu a dále kvůli faktu, že extrémní hodnoty napětí vznikají v přechodových rádiích krčku siloměru.

#### 5.4.2 Kontrola poměrné deformace v místě krčku

Poměrná deformace měřeného segmentu by se pro běžně dostupné tenzometry měla nacházet někde mezi extrémními hodnotami  $\varepsilon_{k\_min} = 0,000001$  a  $\varepsilon_{k\_max} = 0,005$ . Pro prodloužení siloměru v krčku při zatížení  $F_t = 800 \text{ kN}$  a za předpokladu, že  $E_s = 208 \text{ GPa}$  platí:

$$\Delta l_k = \frac{F_t \cdot l_k}{E_s \cdot S_k} = 0,0088 \text{ mm}$$

Pak pro poměrnou deformaci ve stejném místě platí:

$$\varepsilon_{k\_min} < \varepsilon_k = \frac{\Delta l_k}{l_k} = 0,0006 < \varepsilon_{k\_max}$$

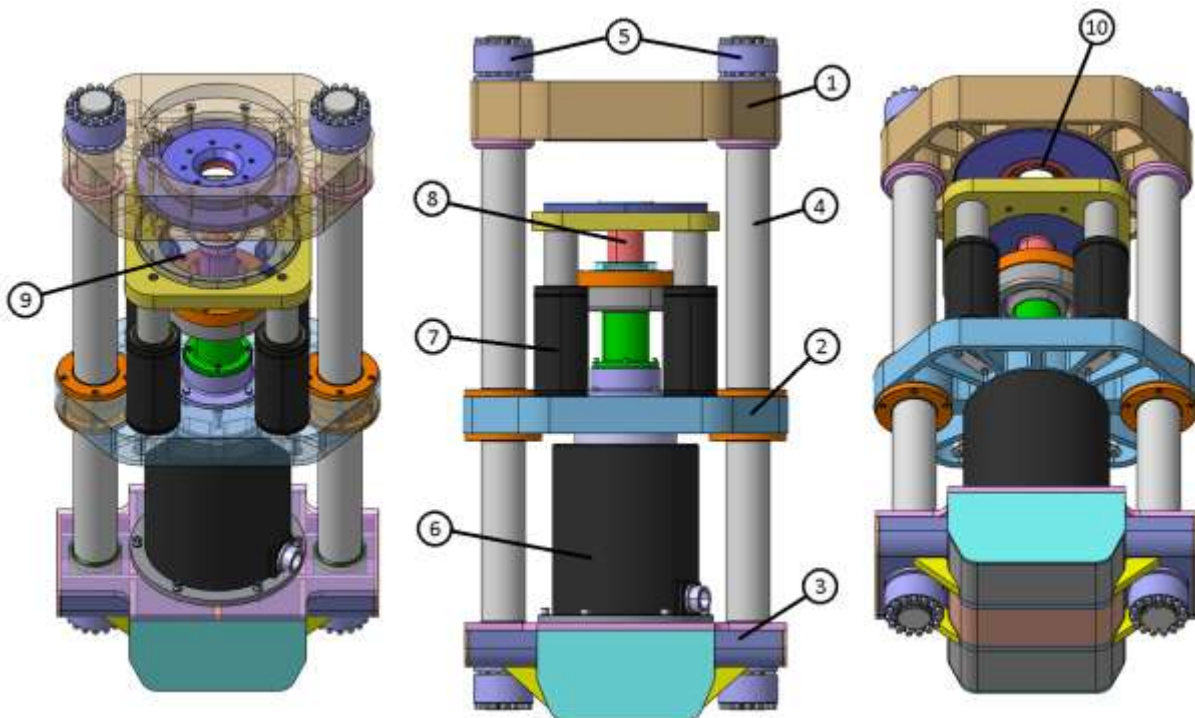
Nakonec pro změnu elektrického odporu na tenzometru s nominálním odporem  $R = 120 \Omega$  a vodičem z konstantanu (citlivost  $k = 2$ ) platí:

$$\Delta R = R \cdot k \cdot \varepsilon_k = 0,141 \Omega$$

## 6 Konstrukční návrh stroje

### 6.1. Obecný popis stroje

Rám lisu je tvořen dvěma sloupy uchycenými v dolní a horní traverze prostřednictvím předepnutých sloupových matic. Sloupy mají vedle nosné funkce také funkci vodící, jelikož je jimi kluznými pouzdry vedena střední pohyblivá traverza tvářecího stroje. Na spodní svařované příčce je upevněn hlavní hydraulický pohon nesoucí střední traverzu s přidržovačem a dalšími měnitelnými nástroji. V horní traverze je uložena deska tažnice s vyměnitelnou funkční částí zahrnující tažnou hranu a otvor pro brzdící kroužek. Přidržovač je ustaven na čtyřech plynových pružinách s dusíkovou náplní, které vyvozují požadovanou přidržovací sílu. Lis (hlavní pohon) je konstruován na maximální sílu o velikosti  $F = 1,5 \text{ MN}$  a z toho přidržovač působí maximální silou  $F_p = 700 \text{ kN}$ .

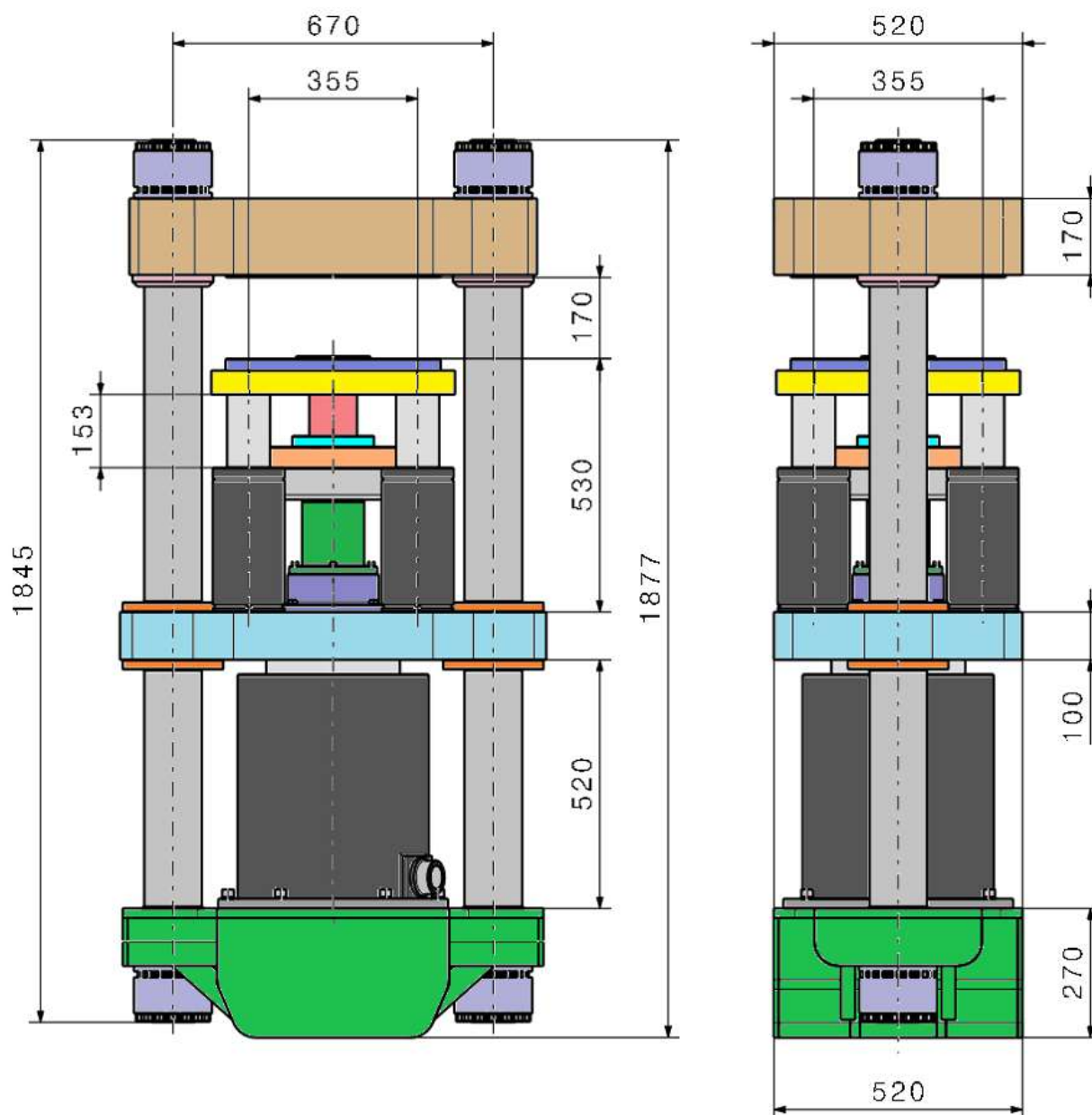


Obrázek 43: Popis hlavních částí stroje.

1 – horní traverza, 2 – střední traverza, 3 – dolní traverza, 4 – sloup, 5 – sloupové matice, 6 – hlavní pohon, 7 – plynové pružiny, 8 – tažník, 9 – přidržovač, 10 – tažnice

Zdvih hlavního pohonu  $h_v = 320 \text{ mm}$  v sobě zahrnuje zdvih plynových pružin  $h_p = 150 \text{ mm}$  a zbylých  $170 \text{ mm}$  připadá na maximální prostor mezi tažnicí a přidržovačem. Na obr. 44 jsou zaneseny důležité rozměry stroje.





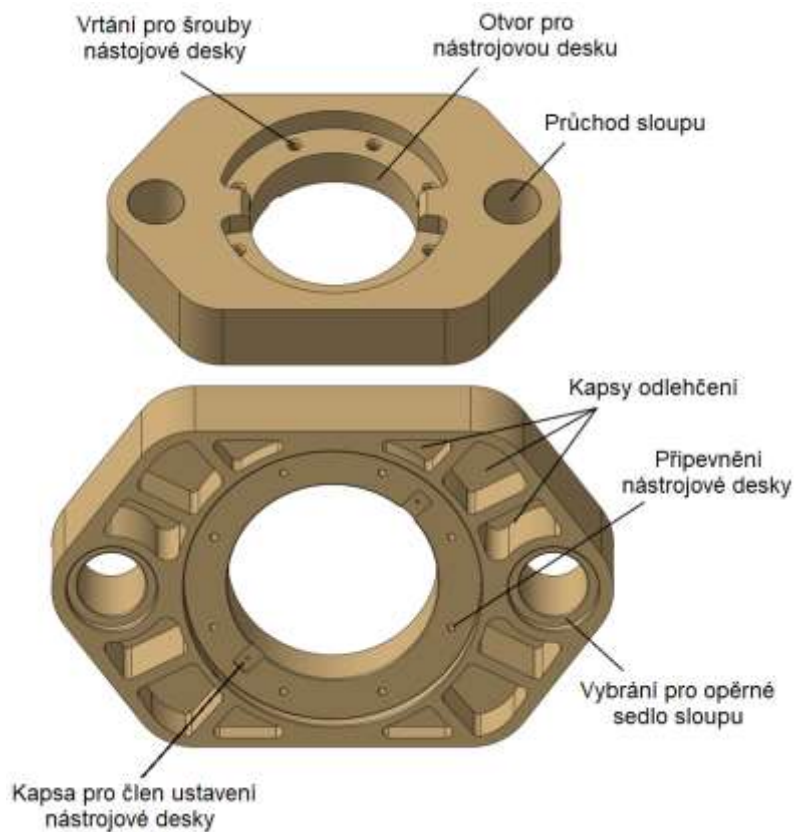
Obrázek 44: Základní rozměry stroje

## 6.2. Horní traverza

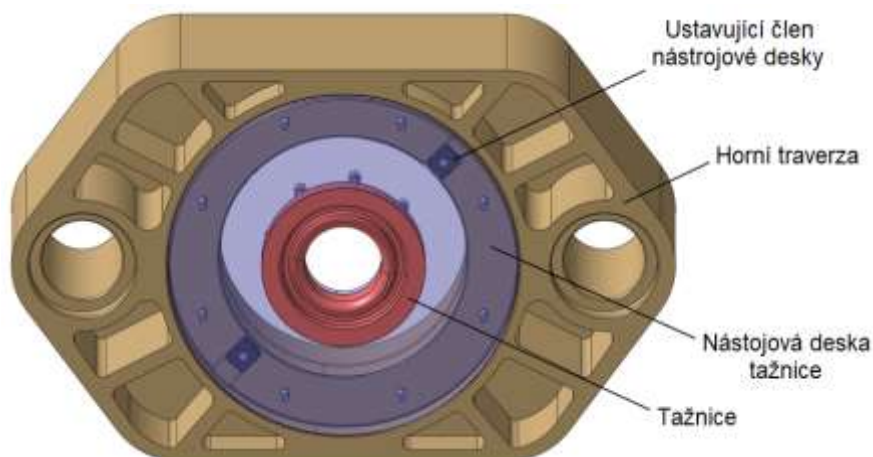
Jak již bylo uvedeno, horní traverza je jednostranně namáhána od síly přidržovače i tažníku. V extrémním případě musí odolat zatížení  $F = 1,5 \text{ MN}$ . Na *obr. 45* je návrh obráběné horní traverzy uvažované z materiálu ČSN 11 523 - nelegovaná konstrukční jemnozrná ocel pro namáhané a svařované konstrukce se středním stupněm obrobitelnosti.

Polotovarem je tlustý ocelový pás, ze kterého se plamenem nebo vodním paprskem vyřízne požadovaný tvar traverzy a následně se frézují vnitřní otvory sloupů a kapsy pro odlehčení. Na závěr se vyvrtají díry pro uchycení desky tažnice. Na horní straně příčky je vně hlavního otvoru vytvořeno odsazení pro šrouby držící tažnici umístěnou na její spodní straně. Dvě protilehlé drážky ve vybrání pro desku tažnice na spodní straně slouží pro ustavení desky v ose tak, aby ji bylo možno snadno přišroubovat.

Na obrázku níže je vidět sestava horní traverzy s připevněnou tažnicí. Na modelu jsou deska i samotná tažnice připevněny osmi šrouby. Jelikož jsou ale nástroje zatěžovány tlakovou silou, je možno je pro rychlejší montáž/demontáž zajistit minimálně čtyřmi šrouby. Tažnice i upínací deska jsou uvažovány z vysokopevnostní oceli ČSN 19 573 s mezí kluzu  $R_e = 2\,900 \text{ MPa}$ . Tažnici je možno vyrobit i jednodílnou například pro méně opakované tahy. Pro FLC zkoušky jsou tažnice opatřeny drážkou pro zatlačení materiálu brzdícím kroužkem.



Obrázek 45: Horní traverza

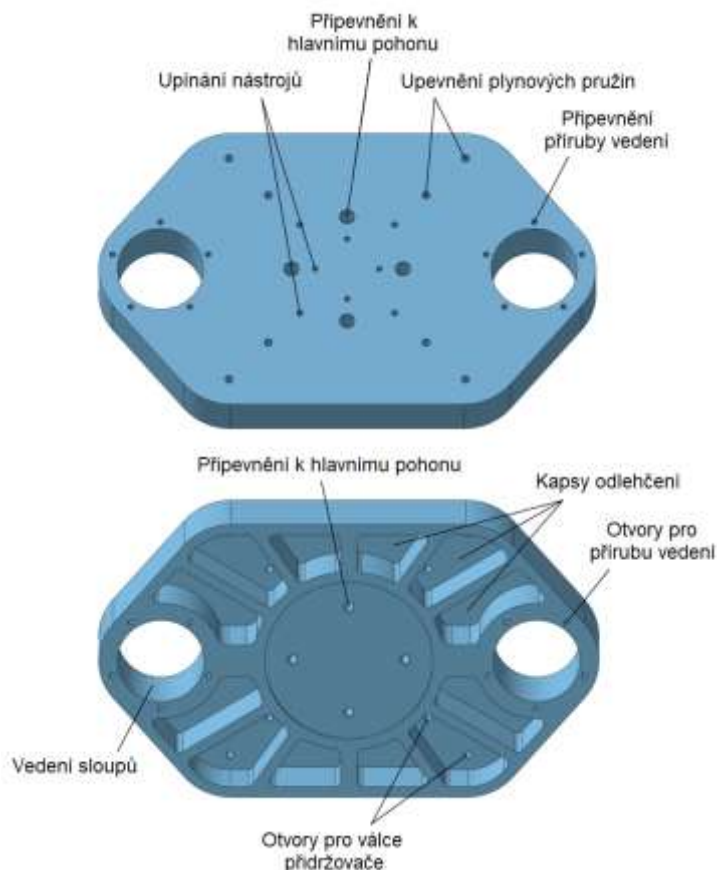


Obrázek 46: Sestava horní traverzy

### 6.3. Střední traverza a přidržovač

Pohyblivá střední traverza lisu je na spodní straně připevněna k plunžru hlavního pohonu. Na horní plochu jsou zespodu připnuty plynové pružiny nesoucí přidržovač. Dále jsou mezi těmito pružinami upínány potřebné nástroje podle toho, zda se bude provádět jedna ze zkoušek hlubokotažnosti (Nakajima, bulge test apod.) nebo klasické tažení. Střední traverza je navržena obdobně jako horní. Uvažován je opět materiál ČSN 11 523.

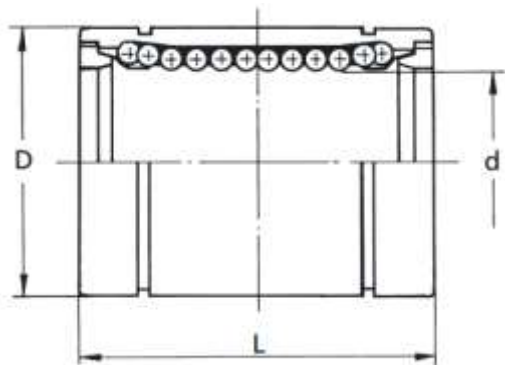
Dvěma krajními otvory je traverza vedena po sloupech. Do otvorů je vloženo kluzné pouzdro *SKF PBM 12014080 MIG1 (příloha 3)*, které je uchyceno mezi dolní a horní víko. Stírací kroužky uložené v těchto přírubách zamezují vniku nečistot do ložiskového prostoru. Alternativou ke kluzným pouzdrům by byla valivá pouzdra s označením *SB02-120* od *Dr. TRETTER*. Kluzná pouzdra zde byla upřednostněna zvláště kvůli relativně malým nárokům na zástavbový prostor, úspoře materiálu a hmotnosti. Porovnání těchto dvou ložisek je vidět v tabulkách níže. Z hlediska statické únosnosti v této úloze obě pouzdra bez problémů vyhovují.



Obrázek 47: Středová traverza

Tabulka 10: Parametry valivého ložiska

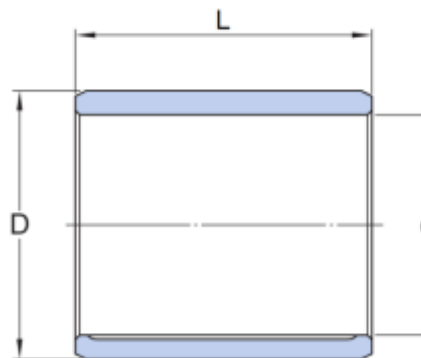
<b>d</b>	120	mm
<b>D</b>	180	mm
<b>L</b>	200	mm
<b>m</b>	15	kg



Obrázek 48: Valivé ložisko Dr. TRETTER

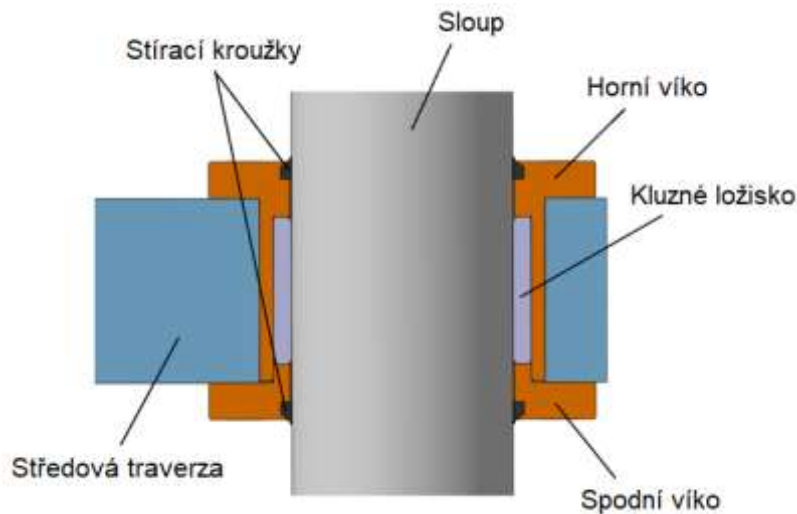
Tabulka 11: Parametry kluzného ložiska

<b>d</b>	120	mm
<b>D</b>	140	mm
<b>L</b>	80	mm
<b>m</b>	2,9	kg



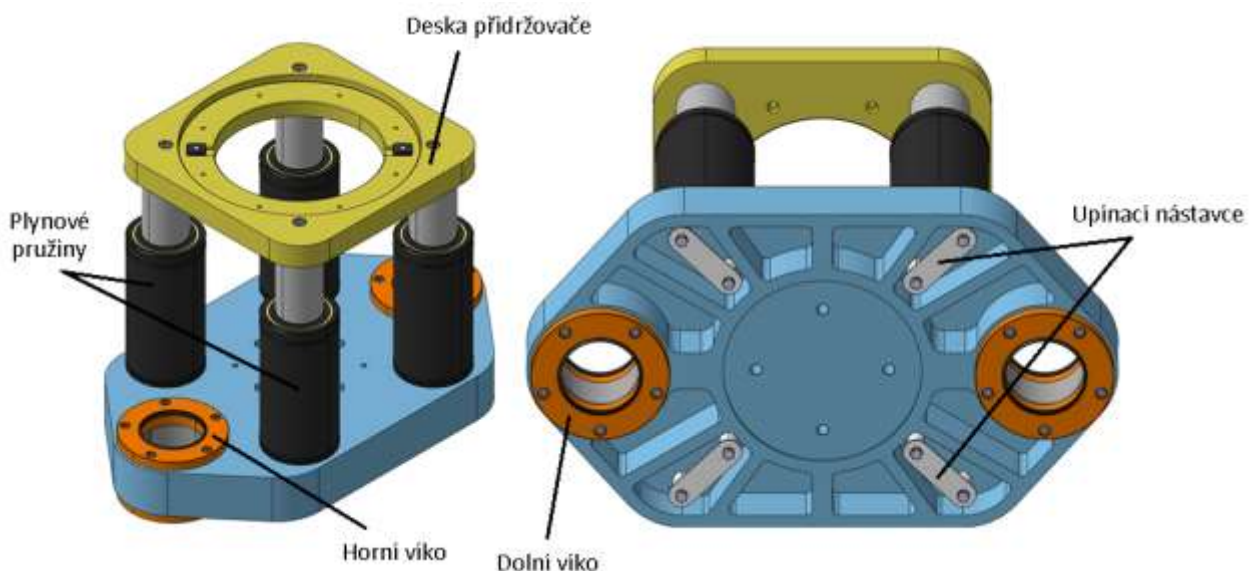
Obrázek 49: Kluzné ložisko SKF

Valivé provedení ložiska je poměrně nenáročné na údržbu a mazání. Také není tolik náchylné na prašné provozní prostředí. Při pomalých zdvihových rychlostech je možno zanedbat element hluchosti. Navržená výška středové traverzy je však pouze 100 mm (viz obr. 44), a proto bylo vybráno menší kluzné ložisko od SKF.



Obrázek 50: Vedení traverzy po sloupu

Přidržovač má vyvodit sílu o velikosti  $F_p = 700 \text{ kN}$ . Jelikož je ustaven na čtyřech pružinách, musí jedna pružina vyvodit sílu alespoň  $F_{p-1} = 175 \text{ kN}$ . Potřebný zdvih přidržovače činí  $h_p = 150 \text{ mm}$ . Pro splnění těchto požadavků byly vybrány plynové pružiny na bázi dusíku TX 20000-150 od firmy KALLER (viz příloha 5). Válce jsou přišroubovány otvory ve vyfrézovaných kapsách na spodní straně desky a rám přidržovače je připevněn k pístům. Do tohoto rámu je pak vložen samotný přidržovač a ze spodní strany pojištěn šrouby. Přidržovač je vždy (na rozdíl od tažnice) jednodílný s otvorem pro průchod nástroje. Dle potřeby je opatřen drážkou pro umístění brzdícího kroužku nebo otvory pro další brzdící segmenty.

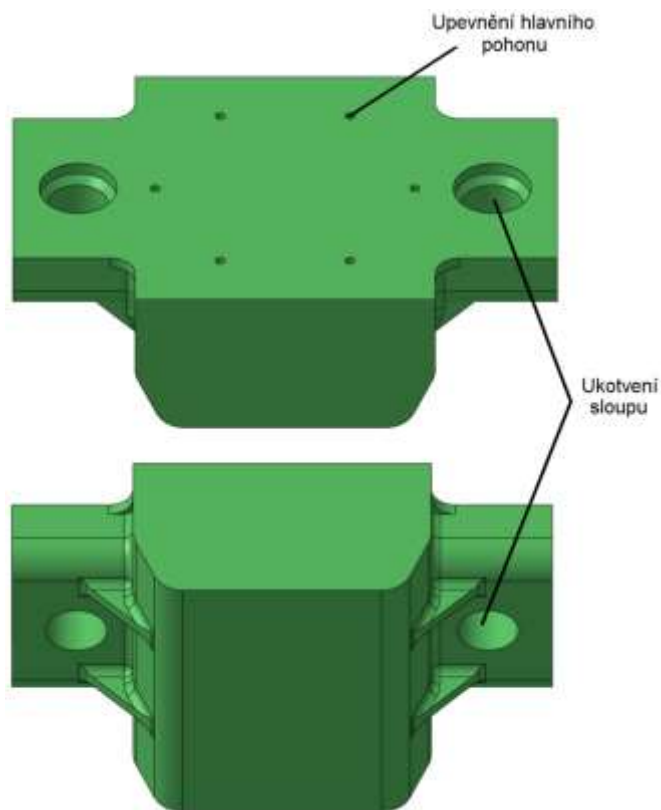


Obrázek 51: Sestava středové traverzy s přidržovačem

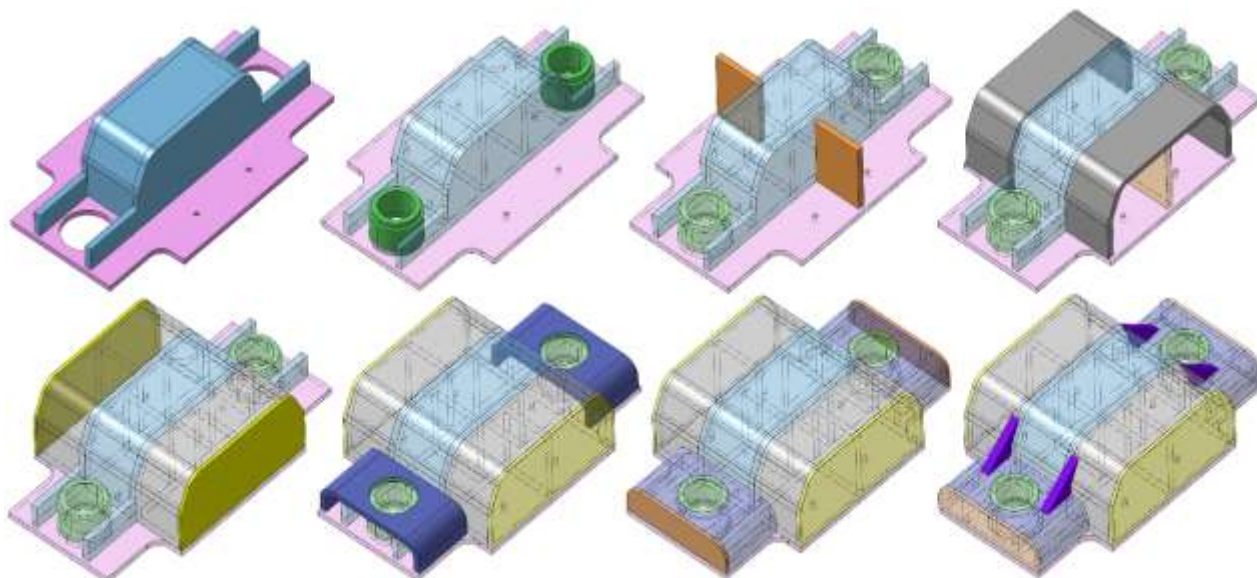


## 6.4. Dolní traverza

Dolní traverza je navržena jako svařenec z plechů a pásů, a to opět z materiálu ČSN 11 523. Konstrukce dolní traverzy musí být o něco vyšší kvůli způsobu uchycení sloupů (viz obr. 55). Sloupová matice se musí vejít pod upínací nástavek svařence při dostatečné výšce od země tak, aby bylo možno utáhnout nebo povolit předepínací šrouby. Z tohoto důvodu zde byl volen svařenec, který zaručí dostatečnou výšku příčky při relativně nízkých výrobních nákladech. Pro případnou demontáž je možno traverzu umístit na platformu, která vymeze prostor mezi maticí a podlahou, takže matice půjde sejmout úplně. Traverza je ze všech stran uzavřená a je v jejím středu zatížena reakční silou od hlavního pohonu, který je přes přírubu připevněn do závitových otvorů v horní desce. Zároveň jsou krajní vetknuté části taženy směrem vzhůru silou přenášenou sloupy. Možný postup svařování uzavřené příčky je vidět na dolním obrázku.



Obrázek 52: Svařenec dolní traverzy

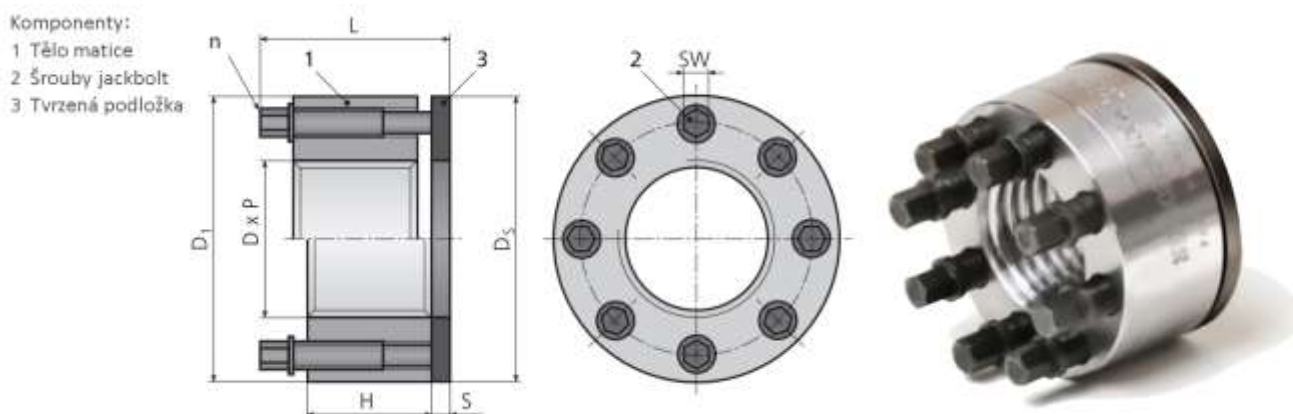


Obrázek 53: Postup svařování dolní traverzy

## 6.5. Sloupy a jejich ukotvení

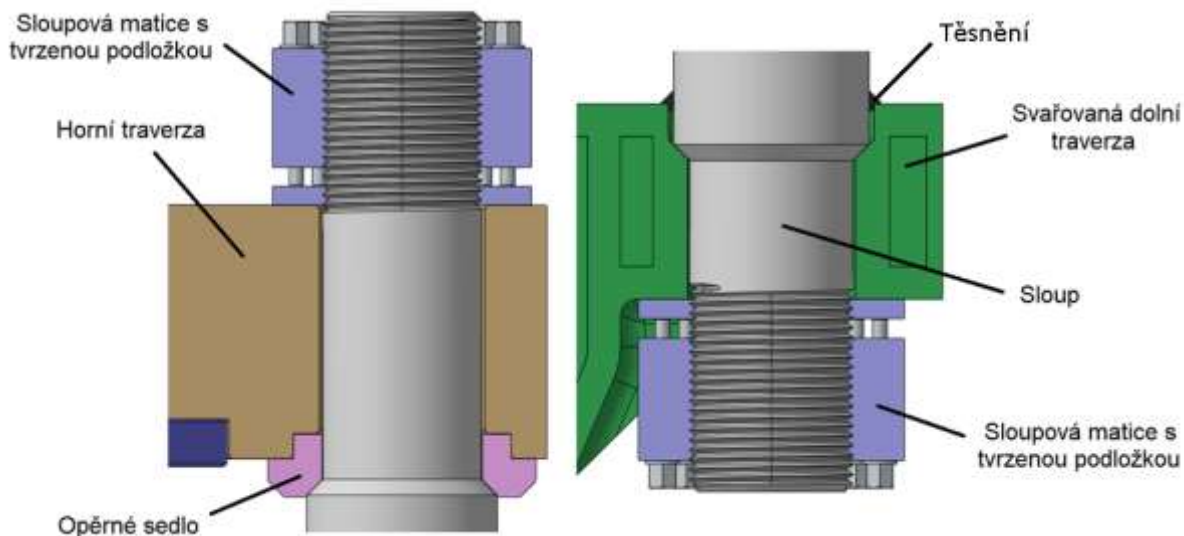
Vodící tyče je možno pořídit jako nakupovanou položku *HW120* (viz příloha 1) u firmy *HYDRAULICS s.r.o.* (zde je též možno poplat zakázkovou výrobu hydraulického pohonu). Nabízí zde kompletní servis včetně požadovaného obrábění, závitování, broušení a indukčního kalení.

Pro kotvení sloupů byly vybrány matice typu *SUPERBOLT MT-M100x6* (viz příloha 2). Matice se skládá z vlastního těla, tvrzené podložky a odtahovacích šroubů „jackbolt“ s malým třecím průměrem, takže jsou schopny vyvinout velkou svěrnou sílu při relativně malém utahovacím momentu. Hlavní závit je díky šroubům rozmístěným po obvodu matice rovnoměrně předepjat a je namáhán čistým tahem. Síla je přenesena šrouby do tvrzené podložky, která chrání stykovou plochu předepínané komponenty.



Obrázek 54: Předepínací matice SUPERBOLT

Způsob uložení sloupů v traverzách je vidět na *obr. 55*. Horní příčka je opřena o kuželové sedlo, které je nasazeno na sloupové zkosení a z horní strany je přitlačena maticí. U dolní traverzy je uložení řešeno obdobně. Zde je sloup postaven do kuželového vybrání v zavařeném válečku a z dolní strany přitážen maticí.



Obrázek 55: Ukotvení sloupů

### 6.5.1 Výpočet utahovacího momentu šroubů sloupových matic

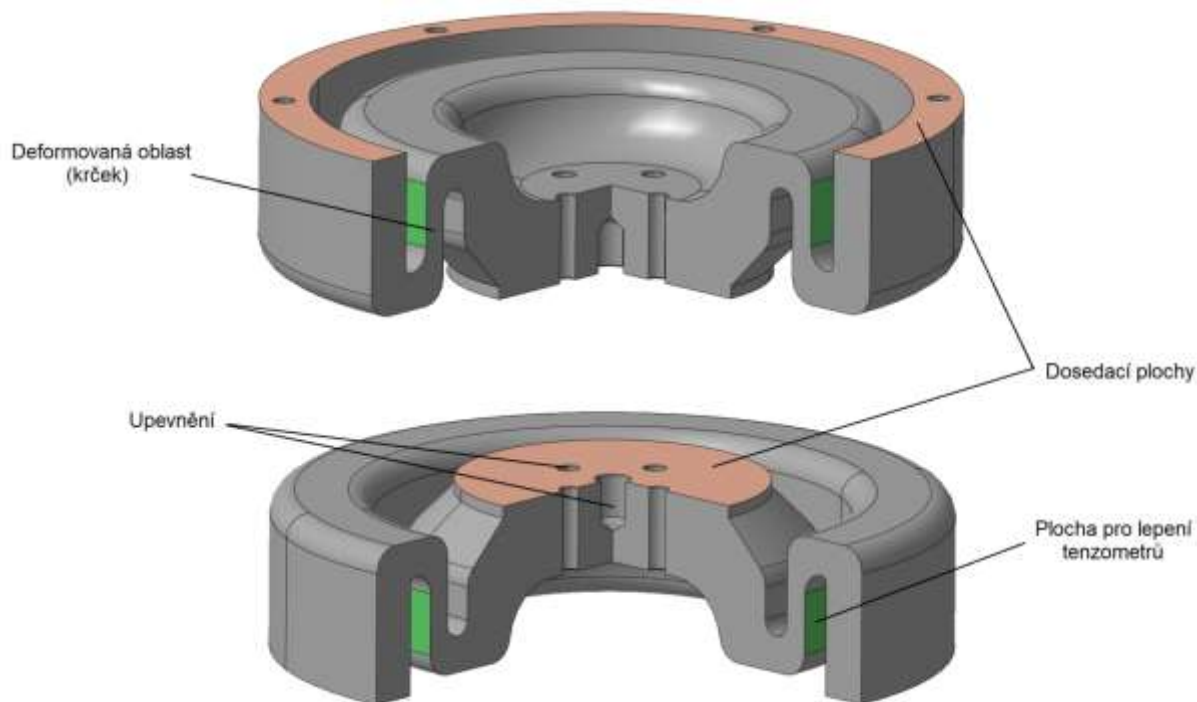
Výpočet pro sloupovou matici *SUPERBOLT MT-M100x6*:

$F = 1,5 \text{ MN}$	Síla lisu
$n_{sl} = 2$	Počet sloupů
$p_m = 1,6$	Míra předepnutí matice
$M12x1,5$	Závit šroubů jackbolt
$P = 1,5$	Stoupání závitu šroubů
$n_{\text{šr}} = 16$	Počet šroubů jackbolt
$d_{2j} = 11,216 \text{ mm}$	Střední průměr závitu šroubu jackbolt
$f = 0,16$	Součinitel tření v závitu
$F_{sl} = \frac{F}{n_{sl}} = 0,75 \text{ MN}$	Síla na jeden sloup lisu
$F_{ps} = F_{sl} \cdot p_m = 1,2 \text{ MN}$	Předepínací síla na sloup
$F_{p\text{š}} = \frac{F_{ps}}{n_{\text{šr}}} = 75 \text{ kN}$	Předepínací síla na šroub
$\alpha_z = \text{atan}\left(\frac{P}{\pi \cdot d_2}\right) = 2,438^\circ$	Úhel stoupání šroubovice
$\varphi_z = \text{atan}(f) = 9,09^\circ$	Třecí úhel
$M_{\text{š}} = F_{p\text{š}} \cdot \tan(\alpha_z + \varphi_z) \cdot \frac{d_2}{2} = 85,79 \text{ Nm}$	Utahovací moment jednoho šroubu matice

Šrouby sloupové matice je třeba utáhnout na moment  $M_{\text{š}} = 85,79 \text{ Nm}$ .

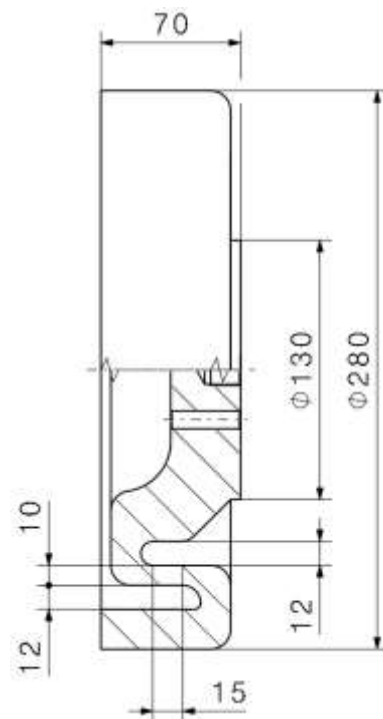
## 6.6. Siloměr

Mechanický siloměr snímá okamžitou sílu působící na tažník. Ačkoliv je snímač zatížen tlakově, z návrhu je zřejmé, že sledované místo je namáháno tahovým napětím. Zelená plocha je místem pro lepení tenzometrů, které s využitím převodníků stanovují velikost výstupní síly na základě lokální poměrné deformace. Z obr. 58 je patrný způsob uložení tohoto siloměru mezi upínací deskou a nástavcem.



Obrázek 56: Model siloměru

Hlavní rozměry siloměru jsou vyznačeny na obrázku vpravo. Firma *COMTES* má v možnostech si přesným obráběním snímač vyrobit sama a tímto způsobem je možno ušetřit jak finančně, tak z pohledu zástavby. Výkonnostní řady tržně dostupných produktů nenabízejí siloměr pro počítané zatížení  $F_t = 800 \text{ kN}$ . Porovnání s parametry snímačů pro zatížení 500 a 1 000  $\text{kN}$  je vidět v následující tabulce. Porovnáváno je s produkty firmy *GTM GmbH* (příloha 4).



Obrázek 57: Hlavní rozměry siloměru

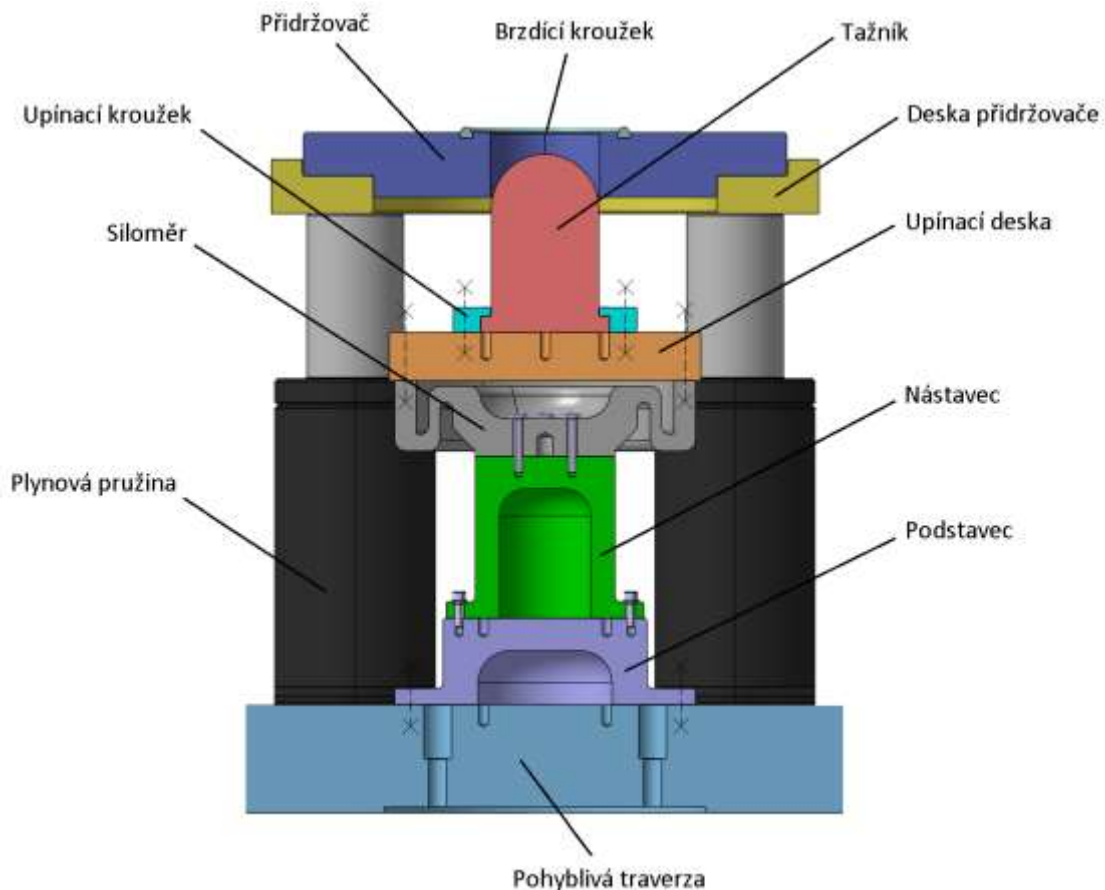
Tabulka 12: Porovnání komerčních siloměrů s navrženým

Model	DR-F 500	Návrh	DR-F 1000
Síla [kN]	500	800	1000
Hmotnost [kg]	29,1	21	44,9
Vnější průměr [mm]	279	280	304,8
Výška [mm]	88,9	70	114,3



## 6.7. Nástroj pro zkoušku dle Nakajimy

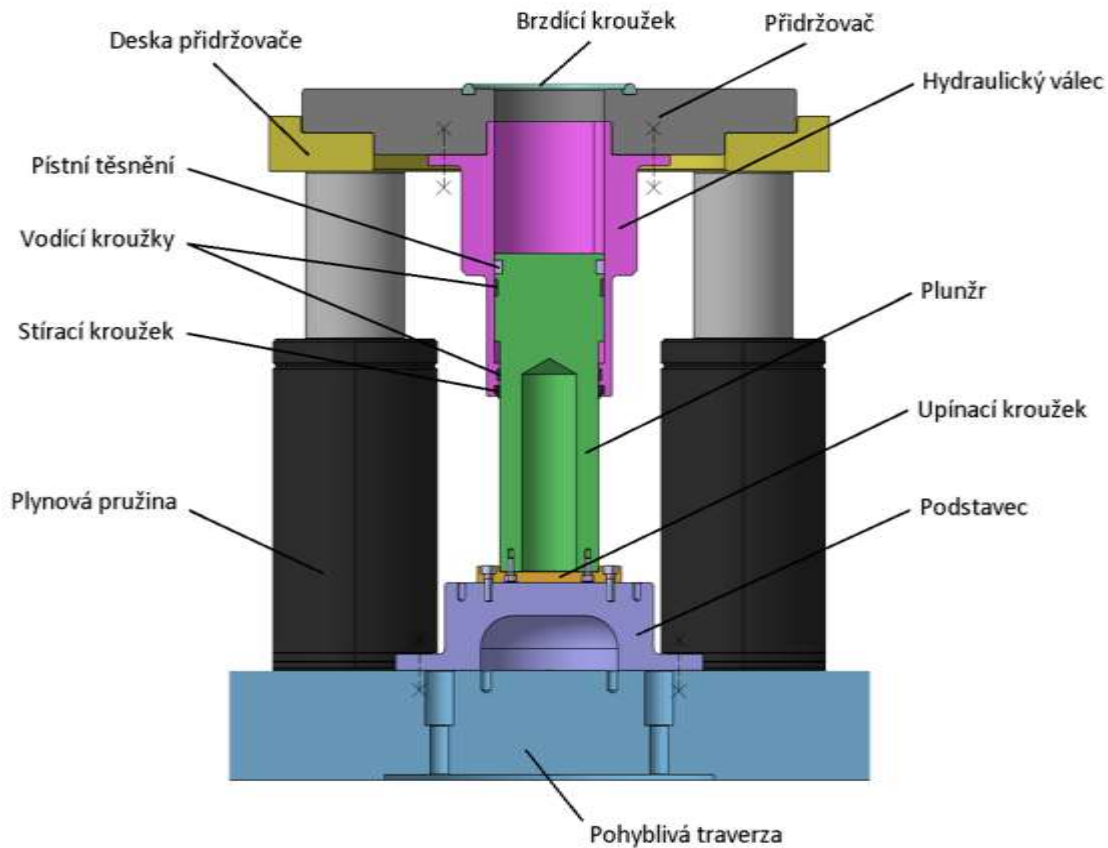
Zkouška dle Nakajimy daná normou ČSN 12004-2 byla popsána v odd. 2.5.6. Kulový tažník je prostřednictvím upínacího kroužku připevněn na upínací desku. Tato deska obsahuje předvrtané díry pro pojistné kolíky a další závitové díry pro variantní upínání různých tažníků a nástavců. Upínací deska je přišroubována k přírubové (obvodové) části siloměru měřícího průběh síly během zkoušky nebo tvářecího procesu. Siloměr je pak středovou částí na spodní straně přišroubován k nástavci vymezujícího relativní výšku nástroje proti přidržovači. Podstavec v dolní části může být přišroubován k příčce nastálo, protože svoji funkci plní v sestavě pro bulge test. Přidržovač je zdola zajištěn šrouby procházejícími tělem žluté desky postavené na plynových pružinách.



Obrázek 58: Sestava pro zkoušku dle Nakajimy

## 6.8. Nástroj pro hydraulickou zkoušku bulge

Hydraulický válec je vystředěn vsunutím do těla přídržovače a navařenou přírubou přišroubován k jeho spodní straně. Stěna válce je v pracovní části zesílena pro práci s vnitřním tlakem o velikosti 60 MPa. Zelený plunžr s vrtaným odlehčením je opatřen pístním těsněním a vodícím kroužkem. Do válce je pak v dolní části zabudován druhý vodící kroužek a na kraji stírací kroužek. Plunžr je přes přídržný kroužek připevněn k podstavci tak, aby byl zajištěn jeho výsuv při zpětném pohybu traverzy. Podstavec je přišroubován ke středové traverze a umožňuje užití minimální délky zeleného plunžru pro potřebný zdvih  $h_p = 150 \text{ mm}$ .



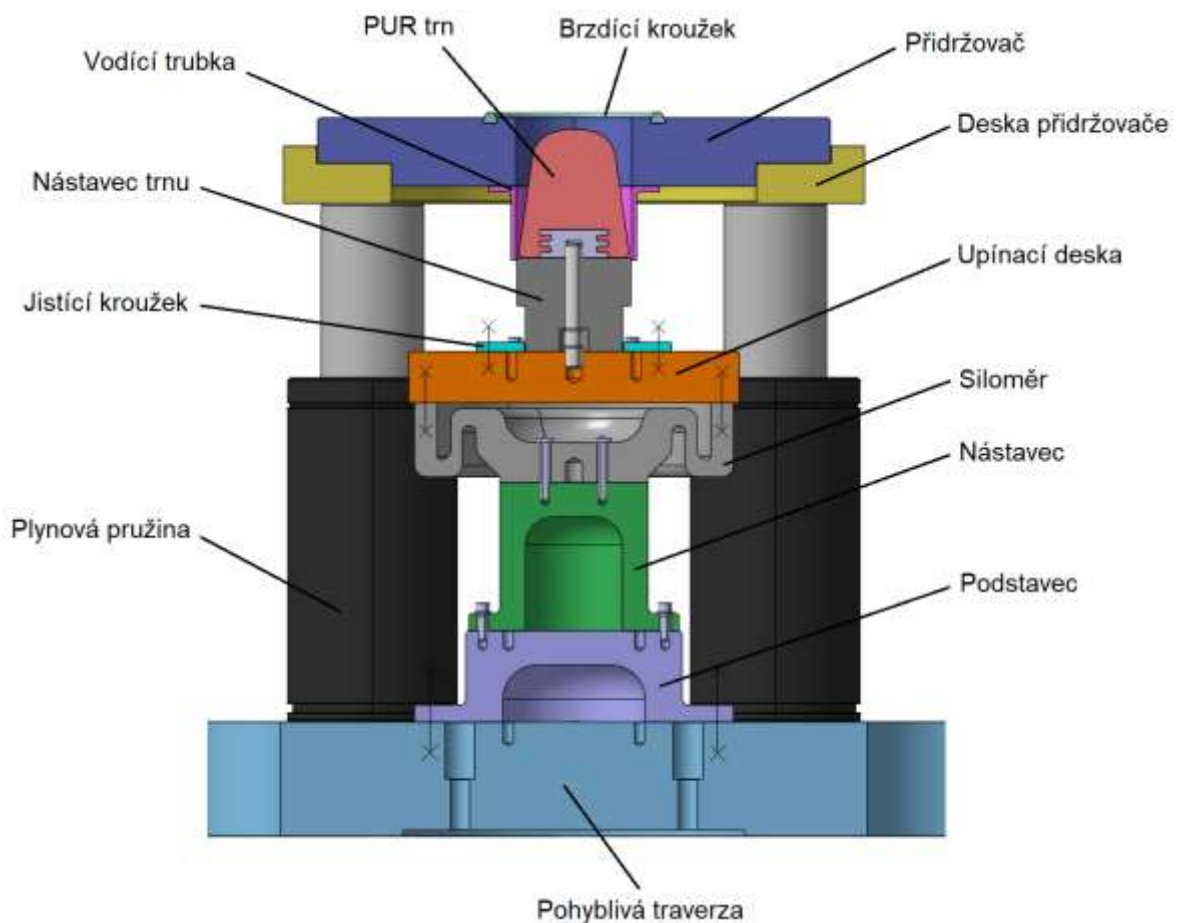
Obrázek 59: Sestava pro hydraulickou zkoušku bulge

## 6.9. Nástroj pro zkoušku s viskózním trnem

Institut ERC/NSM sídlící v Columbusu v americkém Ohio přišel s inovativním řešením bulge testu, kdy je vzorek namísto hydraulického tlaku zatížen „tlakem viskózním“. Je k tomu použit speciální trn z polyuretanu, který se vyznačuje vysokou otěruvzdorností a zaručuje určitou míru opakovatelnosti experimentu. Předností tohoto typu zkoušení je, že nejsou potřeba další prvky hydraulického obvodu a zkoušku lze provádět na klasickém lisu s již dostupnými prostředky. Dále mizí starost v podobě olejového hospodářství. Za zmínku stojí i fakt, že při klasickém bulge testu dochází při protržení vzorku k rozstříku oleje do prostoru, což není příliš praktické.

Produkty z polyuretanu se mohou vyrábět v široké škále tvrdosti ( $10\text{ Sh A}$  až  $85\text{ Sh D}$ ). Navíc je tento materiál velmi houževnatý a vykazuje vysokou míru pružné deformace, takže se trn pod vzorkem přirozeně tvaruje a posléze se navrací do výchozího stavu. Ve vzorku vzniká podobně jako při bulge testu dvousosý stav napjatosti. S využitím systému ARAMIS pak v reálném čase probíhá analýza a vyhodnocení povrchu vzorku (určení FLC křivky, křivky zpevnění).

Polyuretanový trn je možno našroubovat k nastavci trnu a pojistit lepidlem nebo rovnou přilepit. Na spodní plochu přídržovače je možno připevnit vodící trubku, která v případě nadměrné deformace trnu zamezuje jeho natlačení pod přídržovač. Nutno dodat, že tento typ zkoušení není zatím příliš probádaný a nejsou známy bližší podrobnosti o testování ani konkrétní mechanické vlastnosti PUR trnu. [8]



Obrázek 60: Sestava pro viskózní bulge test

## 7 MKP analýza

Pro MKP výpočty v této kapitole byl použit software *Siemens NX 12.0*. Nejdříve bylo nasimulováno zatížení siloměru a následně zatížení celého stroje. Výsledky slouží pro kontrolu správnosti návrhu z předešlých kapitol nebo pro další optimalizaci dílů a konstrukčních uzlů.

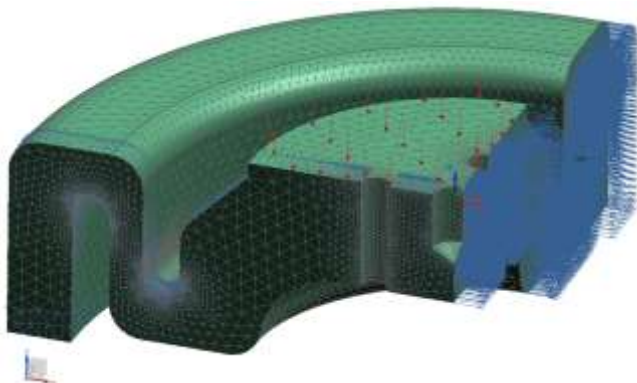
### 7.1. Analýza siloměru

Při simulaci je využito symetričnosti podle dvou rovin a je počítáno s jednou čtvrtinou modelu. Díl před výpočtem nebyl nijak fyzicky upraven.

#### 7.1.1 Tvorba sítě

Pro zasítování je použita 3D tetrahedrová síť s meziuzlem *CTETRA (10)* s velikostí elementu  $5\text{ mm}$ . V kritických místech, tedy v přechodových zaobleních v oblasti krčku, je síť zjemněna na velikost elementu  $1\text{ mm}$ . Materiálem je ocel ČSN 16 640 s následujícími vlastnostmi při  $20^\circ\text{C}$ :

$$E = 206,94\text{ GPa}, \mu = 0,288, \sigma_{k,s} = 735\text{ MPa}.$$



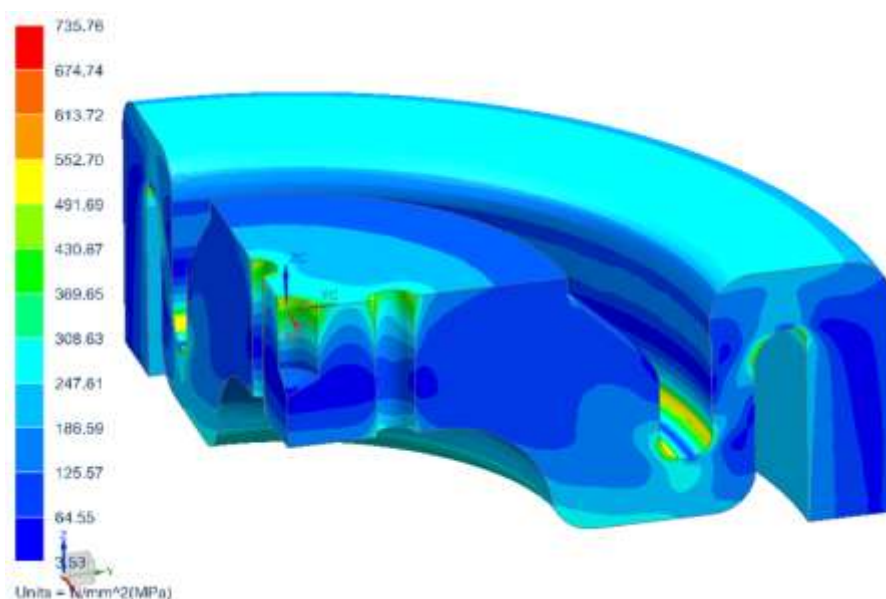
Obrázek 61: Síť a okrajové podmínky siloměru

#### 7.1.2 Okrajové podmínky

Model je zatížen na horní ploše silou  $\frac{F_t}{4} = 200\text{ kN}$ . Stupně volnosti jsou odebírány na rovinách symetrie *YZ*, *ZX* a ve směru *Z* je omezen posuv na dolní obvodové ploše. Tyto podmínky vyplývají ze způsobu uložení siloměru.

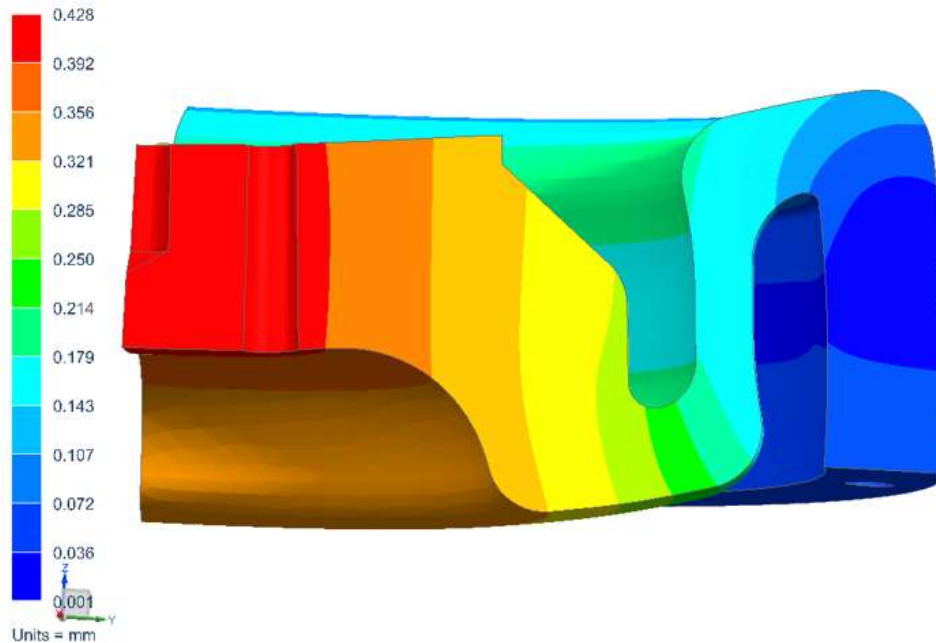
#### 7.1.3 Výsledky

Výsledky ukazují, že nejvyšší hodnoty napětí (získané metodou *von Mises*) vznikají v přechodových zaobleních na krajích krčku (viz obr. 62). Napětí zde nabývá hodnot až  $606,8\text{ MPa}$ , což je stále bezpečně pod mezí kluzu.



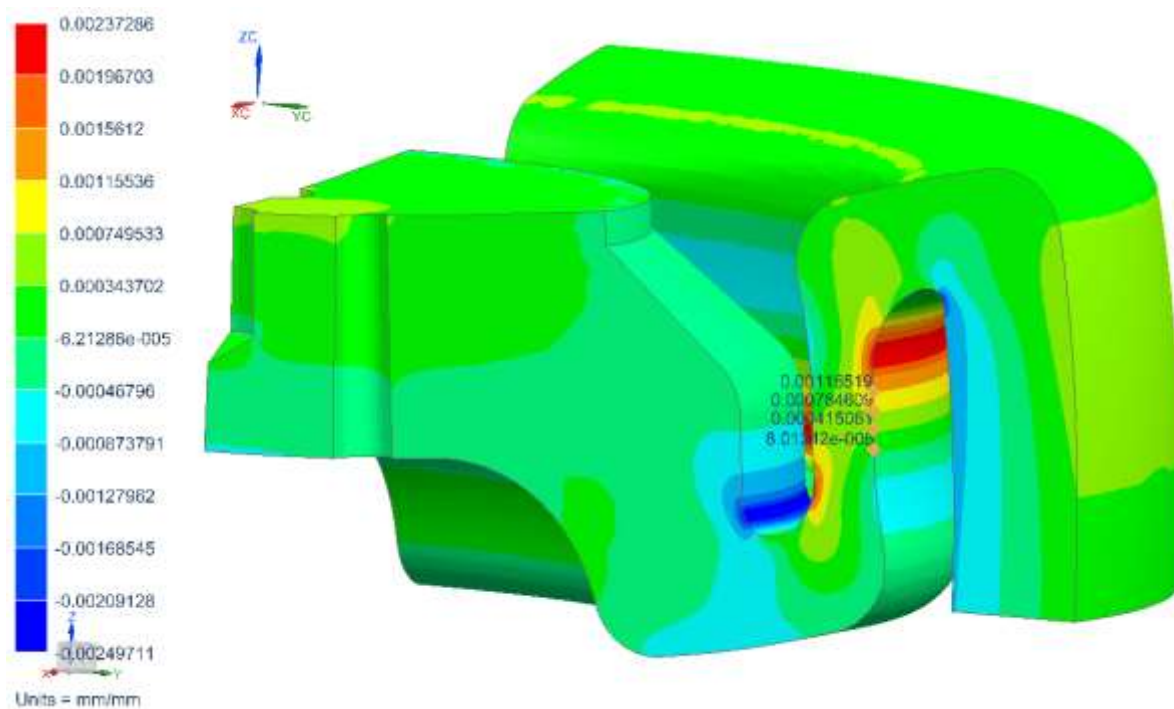
Obrázek 62: Napětíová analýza siloměru (von Mises)

Maximální deformace ve středu siloměru činí  $0,428\text{ mm}$ . Na *obr. 63* je přetvoření zvětšeno na padesátinásobek skutečné deformace. Na správné měření síly tato hodnota nemá faktický vliv.



Obrázek 63: Výsledná deformace - siloměr

Na posledním obrázku je k vidění velikost poměrné deformace (směr ZZ). Výpočty v *kap. 5.4.* se dospělo k poměrné deformaci v oblasti krčku o velikosti  $\varepsilon_k = 0,0006$ . Z výsledků simulace je patrné, že velikost poměrné deformace se v místě předpokládaného lepení tenzometrů mění (viz *obr. 64*). Všechny zobrazené hodnoty se nachází bezpečně mezi  $\varepsilon_{k\_min}$  a  $\varepsilon_{k\_max}$  a jejich zprůměrováním vyjde hodnota  $\varepsilon_{k\_ZZ} = 0,00059$ , která se blíží hodnotě z předešlých výpočtů.



Obrázek 64: Poměrná deformace ve směru Z - siloměr



## 7.2. Analýza stroje

Hydraulický lis je počítán v pracovní poloze při prvním kontaktu tažníku se vzorkem (vybarven červeně). Tento vzorek sice z pohledu výsledků není relevantní, ale pomáhá nasimulovat reálný stav zatížení. Lis je symetrický podle dvou rovin, a proto je počítáno jen s jednou čtvrtinou modelu.

### 7.2.1 Optimalizace modelu

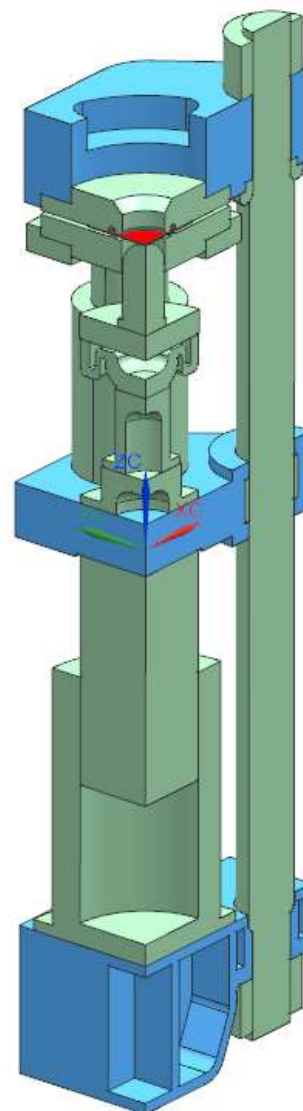
Model celého lisu bylo před samotným výpočtem nutno nejdříve zjednodušit a optimalizovat. Byly odstraněny prvky nepodstatné pro výpočet - otvory šroubových spojů a dále malá zkosení a zaoblení na hranách. Šroubové spoje jsou při simulaci zanedbány. Dále byla sloučena některá těla modelu tak, aby byl zredukován celkový počet kontaktních ploch. Výsledný zjednodušený model je vidět na *obr. 65*.

### 7.2.2 Tvorba sítě

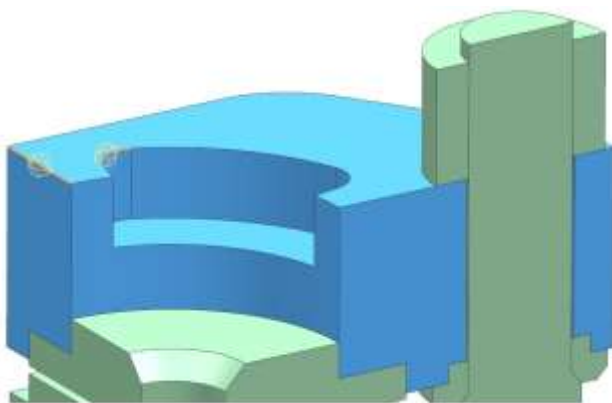
Před zasiťováním modelu byly vytvořeny síťové vazby typu *uzel na uzel – pevné* a dále vazby typu *uzel na uzel – volné*. Druhý případ byl použit pro kontaktní plochy sloupu. Sloup je namáhán tahově, a proto může při zatěžování lisu teoreticky dojít k odlehnutí přilehlých částí. Dále je umožněn pohyb kluzného ložiska po sloupu a také plunžr plynové pružiny ve válci.

Dalším krokem je zjemnění sítě v kritických nebo sledovaných místech. Jemnější síť umožňuje generaci přesnějších výsledků a v praxi to znamená, že velikost výsledného napětí dosahuje nižších hodnot. Síť byla zjemněna v nejnamáhanějším místě horní a dolní traverzy na velikost elementů 2 mm. V případě horní traverzy se jedná o místo největšího ohybového momentu (*obr. 66*) a v případě dolní traverzy oblast svaru v části tažené sloupem (*obr. 67*).

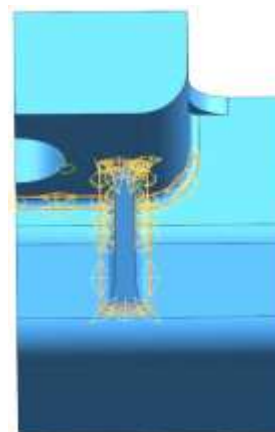
Následně byly vytvořeny konečno-prvkové modely jednotlivých komponentů s ohledem na jejich počítaný objem. Na celý stroj byla použita 3D tetrahedrová síť s meziuzlem *CTETRA (10)*. Velikost elementů sítě byla nastavena v rozmezí 2 ÷ 12 mm.



Obrázek 65: Optimalizovaný model

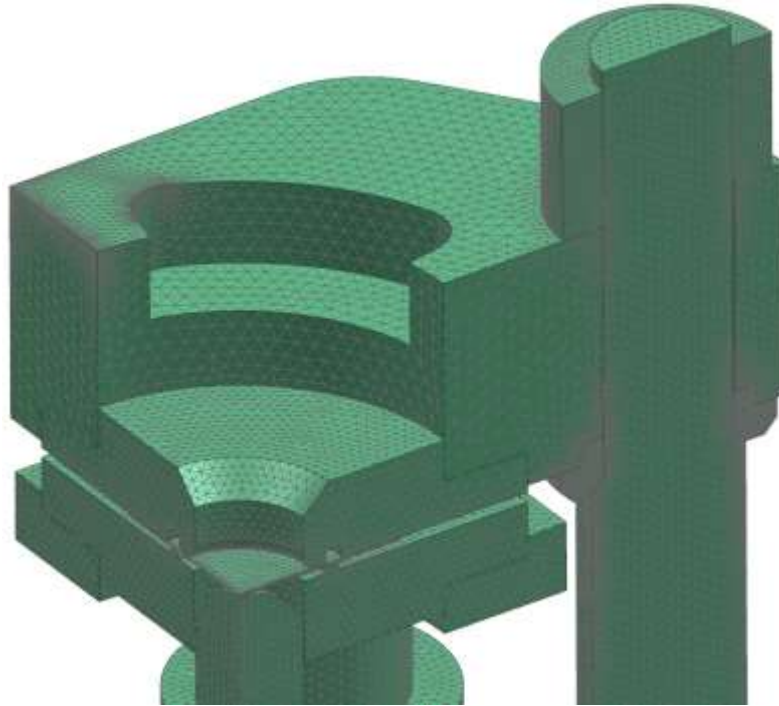


Obrázek 67: Zahuštění sítě v kritickém místě horní traverzy

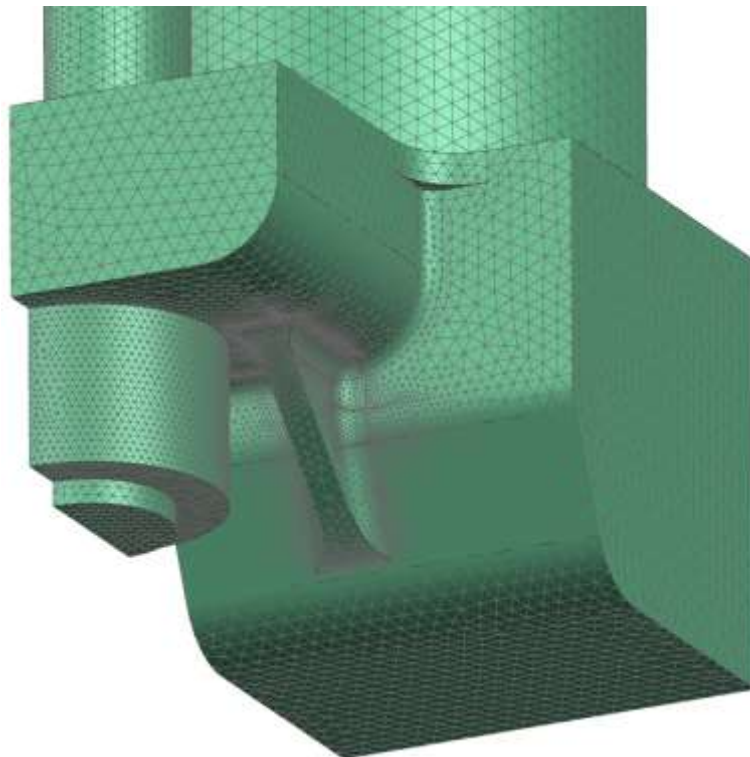


Obrázek 66: Zahuštění sítě svaru dolní traverzy

Materiál všech dílů kromě vzorku byl defaultně nastaven na ocel s následujícími konstantami při  $20^{\circ}\text{C}$ :  $E = 206,94 \text{ GPa}$ ,  $\mu = 0,288$ . U materiálu vzorku byla nastavena mnohem větší tuhost tak, aby při zatěžování nedocházelo k jeho deformaci, ale pouze k přenesení zatížení od tažníku a přidržovače do horní části lisu. Následně byly vytvořeny kontaktní vazby typu *plocha na plochu* v místech, kde nebyla pevná vazba zajištěna při spojování sítí. Na následujících obrázcích je detailnější pohled na vytvořenou síť v oblasti horní a dolní traverzy.



Obrázek 68: Detail sítě v oblasti horní traverzy

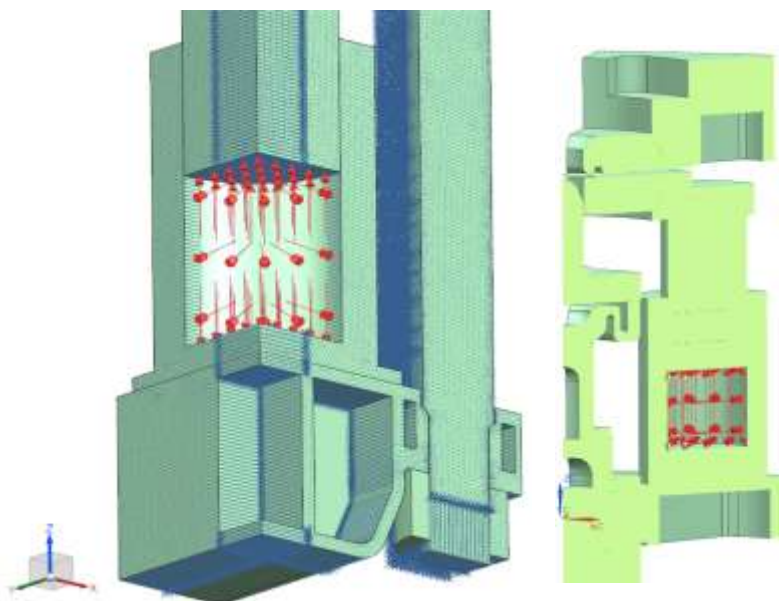


Obrázek 69: Detail sítě v oblasti dolní traverzy

### 7.2.3 Okrajové podmínky

Možnosti posuvů ve směrech  $X$  a  $Y$  byly odebrány v rovinách symetrie  $YZ$  a  $XZ$  dle obr. 70. Posuv ve směru  $Z$  je zamezen na spodní ploše sloupu. Takto jsou vazbové okrajové podmínky nadefinovány dostatečně.

Lis je zatížen v hlavním válci maximálním tlakem  $p_v = 25 \text{ MPa}$ . Zatížení je definováno tak, že na vnitřní stěnu válce je aplikován tlak  $p_v$  a na čelní plochu plunžru a na dno válce působí síla  $\frac{F}{4} = 375 \text{ kN}$ . Stejným způsobem je nadefinováno i zatížení v plynové pružině. Zde působí tlak  $p_p = 13 \text{ MPa}$  a síla  $F_{p_1} = 175 \text{ kN}$ .



Obrázek 70: Okrajové podmínky simulace lisu (vpravo řez plynovou pružinou)

Předepnutí sloupové matice na určitou sílu je možno definovat odsazením kontaktní plochy matice směrem do protilehlé traverzy. Velikost odsazení se zjistí reverzním způsobem, kdy se zjistí hodnota prodloužení sloupu v předepnuté části působením dané síly. Předepínací síla byla stanovena  $F_{ps} = 1,2 \text{ MN}$ .

V případě horní traverzy je při délce předepínané části  $l_{0\_sl\_př\_H} = 170 \text{ mm}$  a obsahu průřezu  $S_{sl\_př} = 7854 \text{ mm}^2$  hodnota prodloužení sloupu následovná:

$$\Delta l_{sl\_př\_H} = \frac{F_{ps} \cdot l_{0\_sl\_př\_H}}{E_{sl} \cdot S_{sl\_př}} = 0,125 \text{ mm}$$

U dolní traverzy je při délce předepínané části  $l_{0\_sl\_př\_D} = 86 \text{ mm}$  hodnota prodloužení sloupu:

$$\Delta l_{sl\_př\_D} = \frac{F_{ps} \cdot l_{0\_sl\_př\_D}}{E_{sl} \cdot S_{sl\_př}} = 0,063 \text{ mm}$$

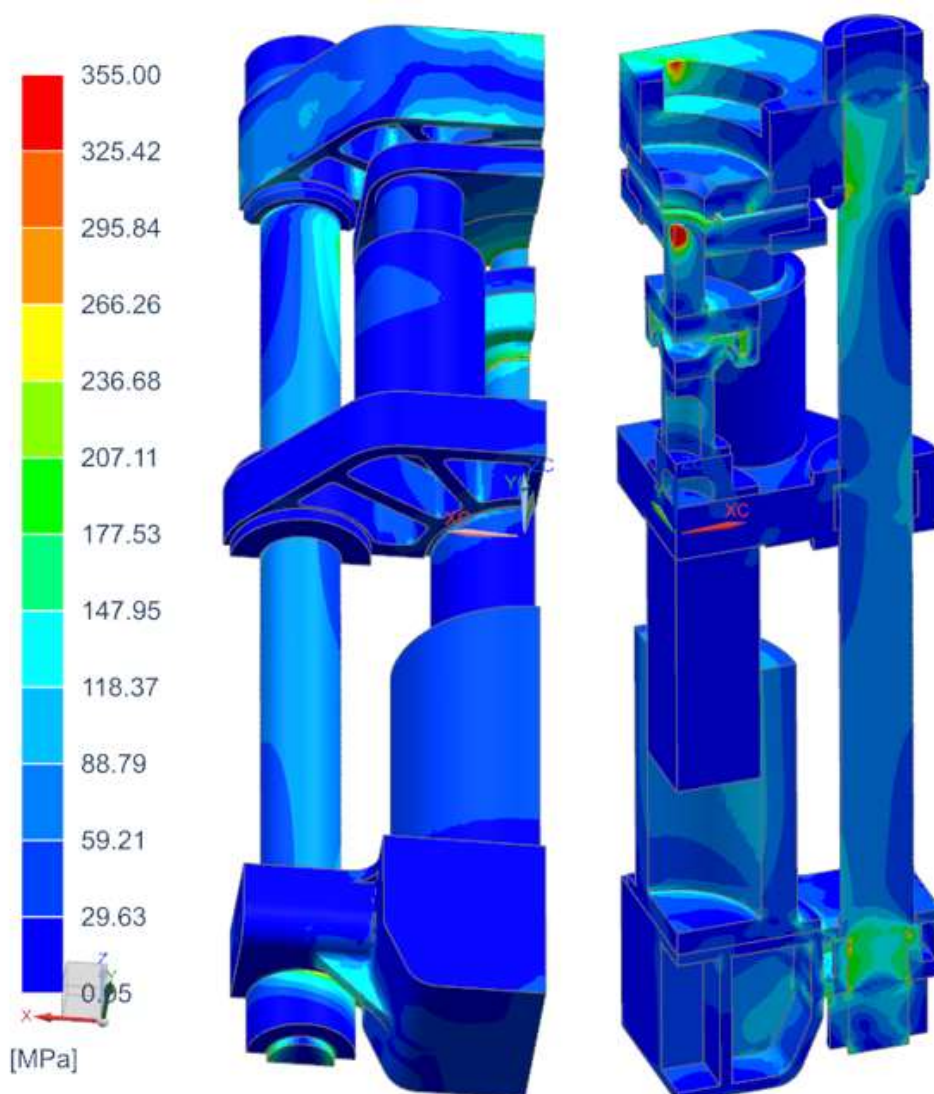
Kontaktní plocha horní matice je tedy odsazena o  $0,125 \text{ mm}$  a kontaktní plocha dolní matice je odsazena o  $0,063 \text{ mm}$  pro vyvození potřebné předepínací síly.



### 7.2.4 Výsledky

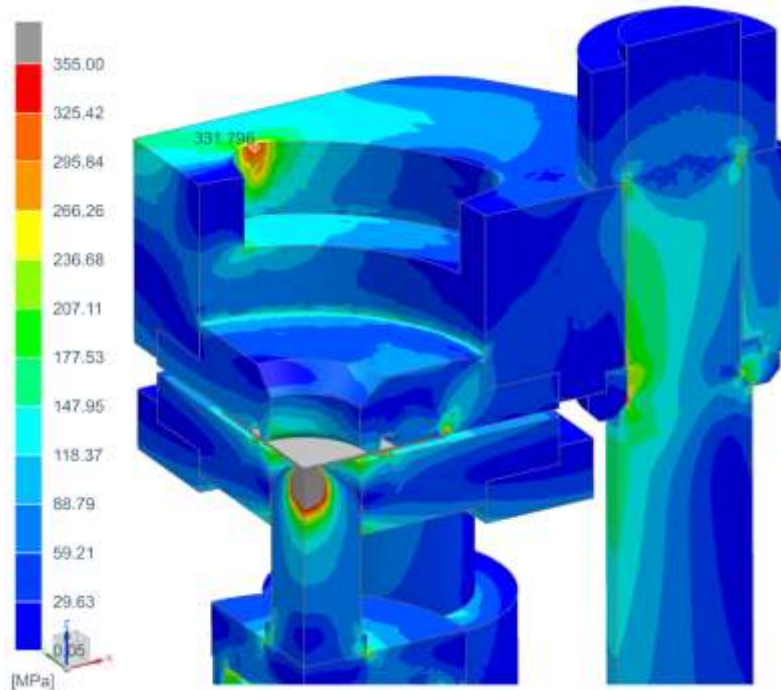
Na obr. 71 jsou vidět kompletní výsledky napěťové analýzy stroje při maximálním zatížení. Veškeré hodnoty napětí uvedené v této kapitole byly zjištěny metodou *von Mises*. Sledovanými částmi jsou zejména horní traverza, sloup a spodní traverza. Dále je překontrolován hlavní pohon a nástrojová část lisu. Siloměr byl nasimulován zvlášť v předešlé kapitole.

Z pohledu na celkové výsledky je ihned patrné, že nejvyšší hodnoty napětí vychází v hlavě tažníku. Maximální hodnota legendy je nastavena na mez kluzu materiálu traverz  $\sigma_{k,tr} = 355 \text{ MPa}$ . Kruhový vzorek byl z tohoto zobrazení vyjmut. Vysoká hodnota napětí v tažníku je způsobena bodovým stykem se vzorkem na jeho dolní ploše. Vzorek má nastavenou mnohem vyšší tuhost a před tažníkem při zatížení „neustupuje“. Na špičce tažníku tedy dochází k singularitě, kterou je zde možno zcela zanedbat. Funkční plochy nástrojů (tažník, tažnice, přídržovač) z materiálu ČSN 19 573 jsou kalené a při zkouškách tyto nástroje bez problémů obstojí.



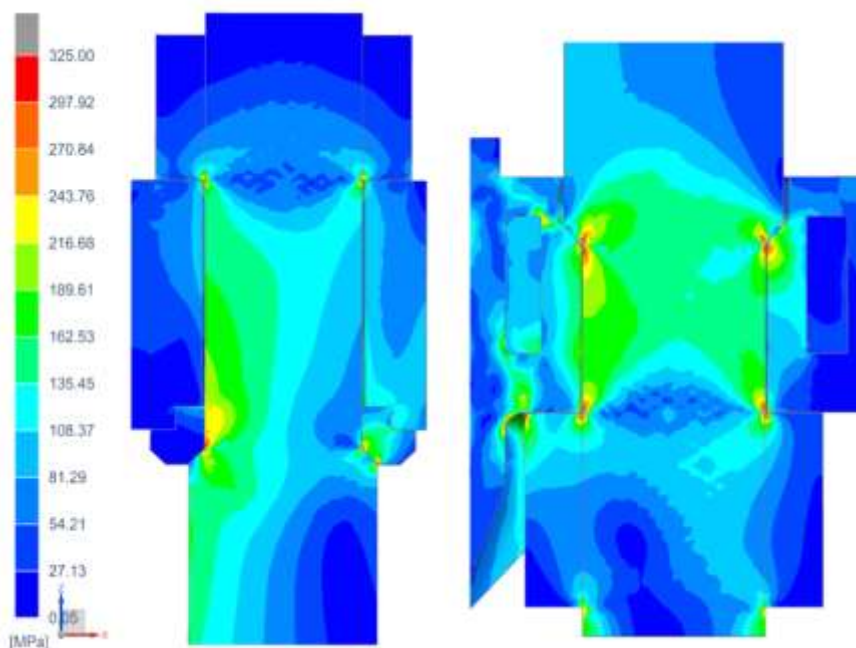
Obrázek 71: Napěťová analýza hydraulického lisu

Horní traverza je zatížena ohybem a horní plocha je napínána. V nejhorším místě bylo změřeno napětí o velikosti 331,8 MPa (obr. 72). Tato hodnota se nachází nebezpečně blízko meze kluzu  $\sigma_{k,tr} = 355 \text{ MPa}$ . Možným řešením pro zvýšení bezpečnosti je větší zaoblení plochy v kritickém místě nebo vyšší traverza.



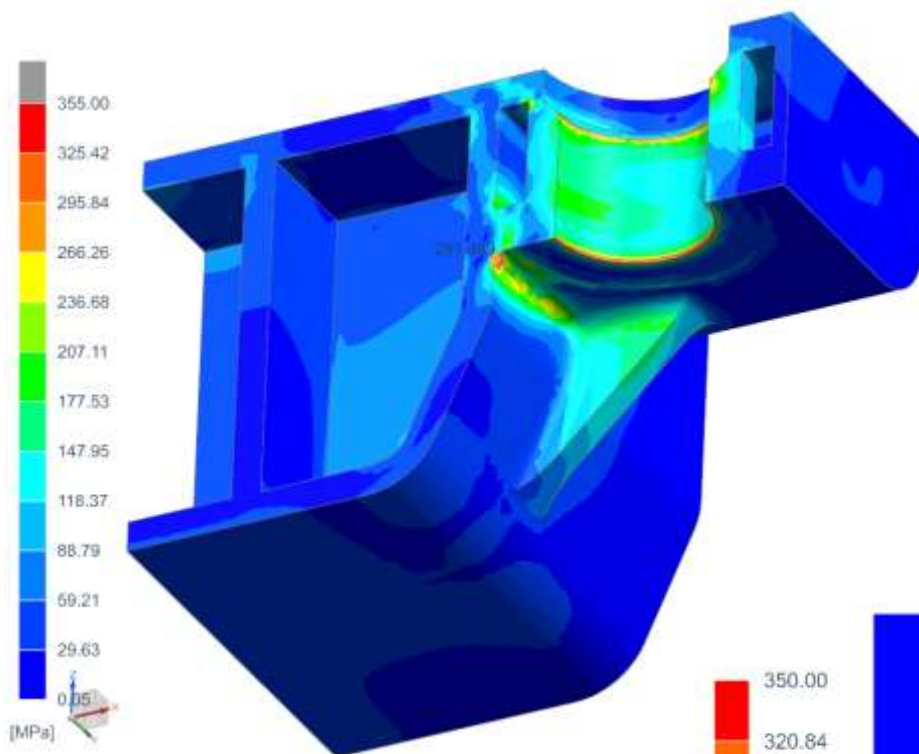
Obrázek 72: Napěťová analýza horní traverzy

Oblasti předepnutí sloupu v traverzách (obr. 73) vykazují geometrické singularity v místech dosedacích hran sloupových matic a opěrky. Tyto singularity mají neblahý vliv na rozložení napětí ve sledovaných oblastech. Jsou ale zanedbatelné, protože nejvyšší hodnoty napětí stále vychází bezpečně pod mezi kluzu sloupu  $\sigma_{k,sl} = 325 \text{ MPa}$ . Z obrázku je patrné, že vlivem natočení horní traverzy dochází k jistému lokálnímu ohybu sloupu v předepnuté části.



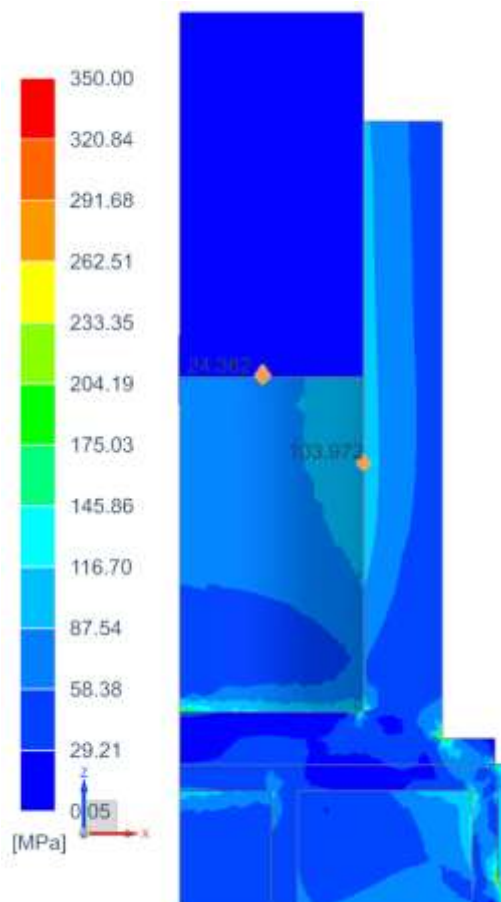
Obrázek 73: Průběh napětí ve sloupu v místech předepnutí

Nejvíce namáhaným místem dolní traverzy je svar v tahově zatížené části na boku nosného těla. Zde při extrémním zatížení vzroste napětí na hodnotu 291,5 MPa. Na hranách průchozího otvoru opět vznikly geometrické singularity, které jsou zanedbány. V případě kvalitně provedeného svaru s plným průvarem traverza v daných podmínkách obstojí. Pro vyšší jistotu je ale vhodné kritické místo lépe vyztužit a zabránit nepříjemnostem plynoucím z potenciálně nekvalitně provedeného svaru. V opačném případě je silně doporučeno prověřit svarovou oblast minimálně jednou povrchovou a jednou z objemových nedestruktivních zkoušek.



Obrázek 74: Napětíová analýza dolní traverzy

Na pravém obrázku je detail napětíové analýzy válce hlavního pohonu. Při analytických výpočtech vyšlo redukované napětí ve stěně  $\sigma_{red,v} (HMH) = 114,8 MPa$ . MKP simulace ukazuje hodnotu napětí na vnitřní stěně válce přibližně 104 MPa. Válec je tedy navržen správně. Z obrázku lze také vyzorovat, že napětí v plunžru je velmi malé (necelých 25 MPa). Plunžry středních a větších hydraulických válců se totiž běžně vyrábějí duté a zde je jasně vidět proč.



Obrázek 75: Napětí v hlavním pohonu

## 8 Závěr

Cílem práce bylo navržení stroje uzpůsobeného pro technologii hlubokého tažení. Důležitou vlastností stroje měla být jeho multifunkčnost a možnost přestrojení na různé typy zkoušek, které se v dnešní době u plechového materiálu provádějí. Stroj měl samozřejmě vyhovět parametrům, které preferuje zadavatelská firma *COMTES*.

Práce začíná porovnáním jednotlivých technologií zpracování kovů s podrobnějším vysvětlením problematiky tažení plechů a zkoušek hlubokého tažení. Zvláštní pozornost pak byla věnována modernímu odměřování deformovaného povrchu využitím metody fotogrammetrie. Poté co byly vyjasněny základní požadavky navrhovaného stroje, byly představeny varianty jeho provedení. Nejprve z pohledu provedení rámu a následně způsobu pohonu nástrojů. Varianty byly mezi sebou porovnány z funkčního hlediska a preferovaných vlastností. Nejlepší varianta byla podrobena analytickým výpočtům a dále rozpracována v programu *Catia V5*. Součástí konstrukčního řešení lisu jsou varianty možného nastrojení pro zkoušky hlubokotažnosti dle Nakajimy a bulge. V závěrečné části byl navržený lis překontrolován s využitím metody konečných prvků v programu *Siemens NX 12.0*. Zvlášť bylo nasimulováno zatížení siloměru a zvlášť zatížení celého stroje.

Lze prohlásit, že cíle práce se podařilo naplnit s jistými rezervami. Autor je spokojen s analytickou částí práce a se zpracováním vybrané varianty lisu, která dokáže pojmout řadu nejen mechanických zkoušek. Rovněž se podařilo navrhnout funkční siloměr optimalizovaný pro tento konkrétní stroj. Sestava nástrojů pro hydraulickou zkoušku sice nebyla součástí simulace, ale analytické výpočty poukazují na realizovatelnost návrhu. *MKP* analýza ukázala, že by některé části stroje potřebovaly optimalizovat pro lepší materiálové využití lisu.

## Bibliografie

- [1] HABRMAN, Martin. Úprava hydraulického lisu na jednoúčelové zkušební zařízení pro hluboké tažení plechu. Plzeň, 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [2] BEZDĚK, Jiří. Technologie výroby tvarové součásti tvářením. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [3] TOMAN, Pavel. Výroba součásti z plechu pomocí technologie HMT. Brno, 2009. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] ŠVORC, Jiří. Konstrukce přípravku pro zkoušku hloubením dle Erichsena. Liberec, 2019. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [5] ČSN EN ISO 12004-2:2008. Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení křivek mezní tvářitelnosti – Část 2: Stanovení křivek mezní tvářitelnosti v laboratoři. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [6] SKOTNICOVÁ, Kateřina, KURSA Miroslav. Prášková metalurgie. Ostrava, 2013. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [7] JELÍNEK, Dan. 3D optické měřicí systémy vhodné pro technologie tváření. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] Sigvant M., Mattiasson K., Vegter H., Thilderkvist P. 2009. A viscous pressure bulge test for the determination of a plastic hardening curve and equibiaxial material data. Int J Mater Form 2:235–242
- [9] 3Dprint.com [online]. [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://3dprint.com/278218/why-it-is-important-to-have-a-broad-sls-powder-range>.
- [10] Stueken s.r.o. [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://stueken.de/cz/technologie/hluboke-tazeni>.
- [11] Geek tech online [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://geektech.me/archaeologists-have-found-one-of-the-largest-weapons-treasures-of-the-iron-age>.
- [12] Saskarc Inc. [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://saskarc.com/history-industrial-metal-fabrication>.
- [13] Erichsen GmbH & Co. KG. [online]. [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.erichsen.de/fr-fr/service/methodes-dessai/sheet-metal-testing/flc-test-according-to-iso-12004>.
- [14] GOM metrology. [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: [https://www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/flc\\_fld\\_EN.pdf](https://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/flc_fld_EN.pdf).
- [15] GOM metrology. [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.gom.com/en/products/3d-testing>.